



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS DEL
CACAO MEDIANTE COMPOSTEO Y SU EFECTO EN
EL SUELO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS (BIOLOGIA)**

P R E S E N T A:

**JORGE FRANCISCO FERNANDO
MOLINA ENRIQUEZ MURGUIA**



**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. NORMA EUGENIA GARCÍA CALDERÓN
2012**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco a

Dra. Norma Eugenia García Calderón, su apoyo y paciencia todos estos años, en particular el apoyo en la aplicación de las técnicas de análisis para sustancias húmicas en suelos y para los análisis físicoquímicos de éstos; las innumerables revisiones de la tesis, su apoyo también en la interpretación de los resultados, la redacción del artículo publicado y la tesis en su conjunto.

Dr. Gonzalo Almendros Martín, su apoyo en el aislamiento de constituyentes libres, coloidales e insolubles de muestras de cascarilla tostada y los productos de su compostaje, y de los suelos tratados con aquellos y con lombrices; los IR de composta y suelos, las técnicas y los programas para los espectros IR; la redacción del artículo y la tesis; y la recuperación de archivos en momentos difíciles.

Los Sinodales, Dr. David Flores Román, Dra. Amada Laura Reyes Ortigoza, Dr. Jorge Enrique Gama Castro, Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento, Dra. Teresa de Jesús Reyna Trujillo, por su apoyo, asesoría y comentarios respecto al trabajo de investigación y la tesis.

La Facultad de Ciencias de la UNAM.

La CGEP de la UNAM, por el apoyo para el desarrollo del posgrado y para la estancia en el CSIC de España.

SIGOLFO-CONACYT por el apoyo económico al proyecto 00-06-003-T.

La Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por el tiempo otorgado durante las distintas fases de este trabajo.

Agradezco en particular a:

C. P. Asunción Broca Burelo, gerente de INCATABSA, la donación de la cascarilla de cacao tostada.

Dra. Italia Mercado Sotelo, Centro de Geociencias UNAM, por el análisis IR de la cascarilla de cacao.

M. en C. María del Socorro Galicia, la asesoría en la extracción y determinación de fracciones húmicas.

Sr. Saúl Genarez, propietario del cacaotal en Teapa del cual se colectaron lombrices y suelo para el composteo y el vermicomposteo.

Dra. Blanca Huizar de Iris, por prestar el terrenos para el experimento de cultivo de maíz con vermicomposta.

Los ecólogos Jaime Jiménez Jiménez, Jorge Antonio García Gómez, Erika Ligonio Izquierdo, Eugenio Osorio Chablé, José Manuel Pérez Obando, su colaboración en el composteo en pila; y Sheyla Ariany Uribe López la identificación de las lombrices.

Dra. Andrea María Elena Piñón Flores, por su apoyo durante todo el desarrollo de este doctorado.

INDICE	página
Resumen	0
1. Introducción	1
La cascarilla: un desecho del cacao que puede transformarse en humus	3
2. Objetivos	7
3. <u>MARCO TEÓRICO</u>	
3.1 El Cacao. Características biológicas, aprovechamiento, y componentes susceptibles de humificación	8
Suelos en los que se desarrolla la planta, inóculo para composteo	9
Composición de la cascarilla: ¿composteo o humificación?	11
Microorganismos asociados al cultivo que pueden afectar el composteo	15
3.2 Las sustancias húmicas y su relación con el cacao	19
3.3 El composteo	34
El proceso de composteo: parámetros	38
Composteo: procedimientos	45
Vermicomposteo. Posibilidades de uso	55
4. <u>MATERIAL Y MÉTODOS</u>	63
4.1 Pruebas previas al composteo y al vermicomposteo:	
a) Efecto de extracto de la cascarilla sobre maíz	63
b) Vermicomposteo de la cascarilla en invernadero	64
c) Respuesta de las lombrices a la cascarilla, en bandejas con suelo	66
4.2 Metodología del composteo, cascarilla de cacao	68
a) La cascarilla como substrato	69
b) Estimaciones para el composteo en pila	69
c) Composteo en pila	70
4.3 Vermicomposteo en capa delgada, en campo	73
4.4 Pruebas de preferencia de las lombrices por la cascarilla o por la composta	74
4.5 Ensayo del efecto de la vermicomposta en un cultivo de maíz	75
4.6 Definición de los efectos en los materiales y en los suelos	78
4.6.1 Extracción y purificación de los ácidos húmicos	79
4.6.2 Análisis de las fracciones de la materia orgánica de los suelos	80
4.6.3 Análisis de las fracciones húmicas mediante espectrofotometría IR	81
4.6.4 Análisis de las fracciones húmicas mediante espectrofotometría de luz visible.	85

5. Resultados y discusión	86
5.1.1 Ambiente de las lombrices colectadas. Ubicación y clima.	86
5.1.2 Descripción del suelo	86
5.1.3 Clasificación con la WRBSR, y con la Soil Taxonomy	89
5.2 Composteo. La cascarilla como sustrato.	90
5.3 Composteo en pila: desarrollo	91
5.4 Cambios ocasionados por el composteo	94
5.4.1 Fracciones de la materia orgánica: cascarilla, composta	95
5.4.2 Resultados de la Espectroscopía vis-UV	96
5.4.3 Espectros FT-IR y cambios que muestran	97
5.5 Efectos del extracto acuoso de cascarilla sobre maíz.	100
5.6 Efectos del vermicomposteo de cascarilla en capa delgada, en invernadero	103
5.7 Resultados del experimento de cultivo de lombrices en bandejas con proporciones bajas de cascarilla.	111
5.8 Cultivo de lombrices en campo	113
5.9 Experimento: aceptación por las lombrices de la cascarilla y de la composta, en campo	115
5.10 Lombricultura: costo de la producción de lombrices	117
5.11 Cultivo de maíz con vermicomposta	118
5.12 Cambios en los suelos	124
a) Suelo T tratado con lombrices: sin enmienda Tsin, con cascarilla Tcas, con composta Tcom	125
b) Espectros IR de las fracciones de extractos AH, AF, y AHpvp	128
c) Suelo R cultivado con maíz, sin vermicomposta Rs y con vermicomposta Rv.	135
Cambios en los compuestos nitrogenados	140
5.13 – Análisis de las fracciones húmicas (método de Kononova) mediante espectrofotometría de luz visible	144
6. Conclusiones	148
Apéndice 7 a –Resultados del vermicomposteo en macetas y sus correlaciones	151
Apéndice 7 b – Vermicomposteo de cascarilla: evolución (peso vs. tiempo)	153
Apéndice 7 c – categoría del suelo bajo el cacaotal en Puyacatengo, según la Soil Taxonomy	155
Bibliografía	160

Resumen. El principal desecho de la industrialización del cacao —cascarilla tostada— se agregó en diferentes dosis a macetas con 1 kg de suelo de un cacaotal (Lixisol húmico) en un experimento de invernadero, agregando luego 5 lombrices (*Pontoscolex corethrurus*) que desarrollaron su actividad durante 60 días. Esta enmienda mejoró ($P < 0.5$) el contenido de materia orgánica en el suelo, la retención de agua, y la densidad aparente. La mejor dosis para la cría de lombrices fue $63.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($1080 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). En un Fluvisol Eutrico en Villahermosa, Tabasco, México, se alimentaron con cascarilla 10 lombrices $\cdot \text{m}^{-2}$; en 67 días se produjeron (promedio) 58 lombrices donde se agregaron $920 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ de cascarilla, y 54 lombrices donde se agregaron $1150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. Posteriormente, la cascarilla se sometió a composteo convencional en pila, y se usó la composta para alimentar 10 lombrices $\cdot \text{m}^{-2}$ en el Fluvisol Eutrico; las alimentadas con $920 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ rindieron 300 lombrices $\cdot \text{m}^{-2}$. El suelo enriquecido, producto de este experimento, se usó como enmienda ($920 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) en un cultivo de maíz con $30,000 \text{ plantas} \cdot \text{ha}^{-1}$ sobre un Acrisol Húmico en una loma elevada: el rendimiento fue de $954 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ sin enmienda, frente a $1137 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ con enmienda. Para definir el grado de humificación se determinaron los principales parámetros de calidad en los materiales y los suelos, y se estudiaron extractos purificados de las fracciones de ácidos húmicos y fúlvicos bajo espectroscopia de luz infrarroja y de luz visible. Los principales cambios observados en la fracción de ácidos húmicos sugieren que las mejoras observadas en las propiedades de la materia orgánica estarían relacionadas con incrementos de grupos funcionales aromáticos, ácidos y amidas, que sugieren un proceso de biodegradación selectiva junto con la incorporación de productos microbianos en fracciones alteradas, oxidadas, de las ligninas de la cascarilla, y que presenta características comunes con el proceso de humificación en los suelos.

Abstract. Toasted husk, the main cocoa (*Theobroma cacao* L.) industrialization by-product, was added to pots in different husk doses with 1 kg of topsoil from a cocoa plantation (Humic Lixisol) and then treated with 5 earthworms (*Pontoscolex corethrurus*) during 60 days, in a greenhouse experiment. The amendment enhanced ($P < 0.5$) soil organic matter, water retention, and bulk density. The best dose for earthworms breeding was $63.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($1080 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). Husk was used to feed 10 earthworms $\cdot \text{m}^{-2}$ in an Eutric Fluvisol at Villahermosa, Tabasco, Mexico; in 67 days, produced 58 worms on husk $920 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, or 54 worms on $1150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ husk. Husk was then subjected to a conventional pile composting, and the compost was used to feed 10 earthworms $\cdot \text{m}^{-2}$ in the Eutric Fluvisol; those fed with $920 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ yielded 300 worms $\cdot \text{m}^{-2}$. The product of the latter experiment was used as amendment (dose $920 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) in a $30,000 \text{ plants} \cdot \text{ha}^{-1}$ maize crop on a highland Humic Acrisol: yields were $954 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ without amendment, $1137 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ amended. As for humification, the main quality parameters for the materials and soils studied, and purified fractions of humic and fulvic acids were studied by visible and infrared (FTIR) spectroscopy. The major changes observed in the humic acid fraction suggest that the improvement in soil organic matter properties could be related to the increase in aromatic, oxygen-containing and amide functional groups, as could correspond to selective biodegradation process concomitant to incorporation of microbial products into oxidized, altered husk lignin fractions, that can be ascribed to a typical humification process in soil.

APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS DE CACAO MEDIANTE COMPOSTEO Y SU EFECTO EN EL SUELO

M. en C. Jorge Francisco Fernando Molina Enríquez Murguía.

1. INTRODUCCION.

En el Estado de Tabasco que abarca 24 millones 475 240 hectáreas (INEGI 1986), 60 612 ha estaban sembradas con cacao (*Theobroma cacao* L.) hacia 1996 (Palma y Cisneros 1996). Aunque sólo abarca 1.3% de la superficie, el cultivo de cacao ocupa el segundo lugar en el Estado, con 19 % de la producción agrícola, sólo superada por el plátano que representó el 31% (Sánchez 1999). En 1990 se producían en México 44 045 toneladas métricas de cacao, de las cuales 32000 (72.6 %) provenían de Tabasco; el 1.33 % de las 2 411 000 toneladas que se producían en el mundo (UNPC 1990). De acuerdo con la Secretaría de Agricultura Ganadería y Recursos Pesqueros (SAGARPA, 2001) en el año 2001 México produjo 38 000 toneladas, de las cuales Tabasco aportó 32 680 toneladas. En 2008 el Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera reporta como producción anual de Tabasco 27 531 toneladas como promedio de 1998-2008; en Mayo del 2010 el Director de la procesadora de cacao de Comalcalco refiere al diario El Financiero que en los últimos 10 años Tabasco produce 15 mil toneladas al año como promedio.

La industrialización del cacao representa un 4.7 % de la actividad industrial en ese Estado (Siller 1999). Durante el proceso industrial la semilla del cacao intercambia con su tegumento, al tostarse, compuestos que aportan sabor, aroma y calidad a los productos; el tegumento es luego eliminado como **cascarilla** (que constituye un 7.2 % en peso de la semilla), y se convierte en el desecho principal, inevitable, de esa industrialización. Así, 46 800 toneladas de cacao industrializado en 2004 significaban 3 370 toneladas de cascarilla; de tal forma 15 000 toneladas de cacao dan lugar a 1 080 toneladas de cascarilla.

La cascarilla cruda presenta 20% de compuestos semejantes a aquellos de la semilla (Chatt 1953): el saborizante y aromatizante del cacao, sustancias

estimulantes, pigmentos, un precursor de la vitamina A, grasas, celulosa y algunos minerales. Sin embargo, dado que sus cantidades son pequeñas respecto a las presentes en la semilla, su extracción es poco rentable. Se ha ensayado utilizarla en alimentos para animales, pero a éstos les afecta la teobromina y la cafeína que contiene. Se ha extraído mantequilla con alto contenido en sitosterol (utilizado como “protector solar”), pero es mucho más costoso que extraerlos de la semilla. Sus contenidos en grasas y celulosa resultan inconvenientes si se usa como abono.

La humificación de los desechos vegetales en los suelos tiene lugar a través de: la acción de microorganismos, principalmente bacterias y hongos; la interacción de compuestos vegetales o microbianos simples (azúcares, aminoácidos, aminoazúcares, fenoles, lípidos) con las arcillas, principalmente las esmectitas que abundan en algunos suelos tropicales (Borchardt 1977, Huang y Schnitzer 1986); y a través de su interacción con compuestos vegetales resistentes a la descomposición (celulosa, ligninas, polifenoles, compuestos aromáticos poliméricos, grasas, ceras, resinas, pigmentos carotenoides, porfirinas y proteínas), que interactúan todos ellos produciendo compuestos altamente polimerizados que resisten la descomposición microbiana, aportando a los suelos propiedades que favorecen el desarrollo de las plantas y otros organismos (Almendros 2008, Schnitzer y Khan 1972; Coleman et al. 1989, Stevenson 1994). Se ha comprobado que el composteo puede producir en el material compostado fracciones húmicas con mayor capacidad para ligar cationes (Plaza et al. 2005).

En algunos suelos de las regiones tropicales húmedas, la intensa biodegradación (Fassbender y Bornemisza 1994) desarrollada por los microorganismos que son abundantes bajo esas condiciones bioclimáticas (Theng et al. 1989, Duxbury et al. 1989) puede ser compensada en parte por la estabilización de la materia orgánica junto con los minerales de arcilla (Stevenson 1994), y los procesos de humificación a que dan lugar organismos del suelo como los hongos (Jennings y Lysek 1996) y las lombrices (Fragoso et al. 1995).

Aplicando estos principios, los suelos y la edafofauna bajo un cultivo pueden ser utilizados para humificar los desechos industriales de las plantas cultivadas.

El objetivo de este trabajo fue transformar la cascarilla de cacao a composta y a vermicomposta, para usarlas como enmiendas en suelos. Se desarrollaron experimentos adicionales verificando la respuesta de maíz (*Zea mays* L. var. H24) a la vermicomposta, y análisis especiales con el fin de validar los productos obtenidos respecto a su humificación.

LA CASCARILLA: UN DESECHO DEL CACAO QUE PUEDE TRANSFORMARSE EN HUMUS

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es una planta con flor que fue domesticada en Mesoamérica, de la cual se aprovecha principalmente la semilla, para obtener manteca de cacao y el extracto de cacao, a partir de los cuales se producen el chocolate y sus derivados, incluidos los saborizantes y aromatizantes. La semilla se deja secar sin exponerla al sol (para que no pierda el aroma y otras propiedades), y luego durante el proceso industrial se tuesta: entonces intercambia con la cascarilla (que le recubre) sustancias que le imparten calidad, sabor y aroma a los productos, extracto o esencia de cacao y chocolate, polvo de cacao y mantequilla de cacao. Una vez tostadas, la cascarilla y la semilla se separan fácilmente de manera manual o sometiendo la cascarilla a una fuerte corriente de aire, y es entonces cuando la cascarilla deja de ser útil en la producción: se convierte en un desecho inevitable de la utilización del cacao.

Al incorporar la cascarilla en alimentos balanceados para animales, sus contenidos de teobromina y cafeína alteran la conducta de aquellos (Broca, 1998): tienen efectos desfavorables en ratas (Tarka et al. 1991; Wang et al. 1992), y en caballos (Delbeke y Debackere 1991). Alevines de mojarra *Oreochromis niloticus* la aceptan pero no mejora su crecimiento (Falaye y Jauncey 1999); como complemento para alimentar pollos sólo resulta favorable en bajas proporciones (Olubamiwa et al. 2002, Abbiola y Tewe 2003). Como alimento para cabras no resultó mejor que los residuos de la industria cervecera (Aregheore 2004). En vermicomposteo, la cascarilla mejoró la supervivencia de las lombrices

de la especie *Eisenia andrei*, pero se produjo más vermicomposta usando mezcla de cachaza de caña de azúcar con estiércol (Sánchez et al. 2007). Los fertilizantes NPK resultaron más eficientes para aumentar el rendimiento de jitomate cuando se combinaron con granos de cacao desechados, o cascarilla, y estiércol, gallinaza y estiércol de cabra (Ojeniyi et al. 2007); la cascarilla aportó más fósforo y potasio, y con ésta se obtuvo un rendimiento en frutos de 177% (Odedina et al. 2007).

La cascarilla puede transformarse en material orgánico semejante al humus, mediante composteo y vermicomposteo: sus componentes, relativamente complejos y resistentes a la degradación, pueden ser convertidos en sustancias más complejas e incluso asociarse con arcillas, como caracteriza al proceso de humificación. El cacao tostado presenta aminoácidos libres y azúcares reductores precursores de la reacción de Maillard, compuestos polifenólicos epicatequina y procianidinas que se oxidan durante el secado, metilxantinas que son poco afectadas por el tostado, purinas –teobromina y cafeína– (Cros 2000), cuyas propiedades favorecen su transformación hacia sustancias húmicas. El humus se encuentra formado por la fracción de la materia orgánica de los suelos constituida por compuestos altamente polimerizados que son resistentes a la degradación microbiana y aportan al suelo propiedades favorables para el desarrollo de las plantas y de otros organismos (Schnitzer y Khan 1972; Coleman et al. 1989). Los desechos vegetales se pueden humificar en parte debido a la acción de microorganismos, principalmente bacterias y hongos, cuando al degradarse algunos componentes orgánicos se generan productos macromoleculares más complejos que el material de partida (Stout et al. 1981; Stevenson 1994), y en parte también cuando han experimentado interacción con otros compuestos vegetales resistentes a la descomposición.

En los suelos del trópico húmedo, los materiales parentales y los edafoclimas con temperatura y humedad elevadas (Coleman et al. 1989; Fassbender y Bornemisza 1994), pueden favorecer también la humificación mediante la actividad de sus abundantes y diversos microorganismos (Theng et al. 1989, Duxbury et al. 1989), hongos (Jennings y Lysek 1996), y lombrices

(Fragoso et al.1995). En ciertos ambientes edáficos tropicales los procesos de humificación se ven favorecidos por:

- a) los regímenes de inundación-desechamiento, dado que la anoxia subsecuente a la saturación preserva los materiales orgánicos que son la materia prima para la producción de sustancias húmicas, y ésta última se acelera durante la desecación en la época con déficit hídrico.
- b) la presencia de arcillas producidas por el intemperismo y la edafogénesis de los diversos minerales, que adsorben productos de la descomposición de material vegetal y animal, favoreciendo su complejación y favoreciendo su conversión a materiales húmicos; por ejemplo, los compuestos vegetales simples interactúan con las arcillas, esmectitas o caolinitas, abundantes en los Vertisoles y comunes en las planicies aluviales (Borchardt 1977), que en Tabasco ocupan un 44 % de la superficie del Estado (Palma y Cisneros 1996, INEGI 1986).
- c) los materiales de arcilla amorfos (en particular, el alofano) que forman complejos con la materia orgánica y favorecen la formación y estabilidad del humus (Stevenson 1994), y también las cloritas (Bruun et al. 2010).
- d) los microorganismos, los cuales contribuyen con polímeros y pigmentos ya sea estructurales o resultantes de su actividad metabólica (Paul y Clark 1996).
- e) la fauna edáfica, que además de agregar y mezclar sustancias de origen vegetal, aporta sus secreciones, sus excreciones y sus cadáveres (Lal 1987; Beckinser 1997).

Varias de las condiciones presentes en las planicies aluviales de Tabasco (donde se realizaron los experimentos) se pueden aprovechar para un composteo más rápido, por un lado, y para favorecer la humificación por el otro.

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL: Transformar la cascarilla de cacao a composta y vermicomposta.

Objetivos Particulares:

- 1.- Definir la composición química de la cascarilla de cacao, sus componentes susceptibles de humificación; determinar sus características como substrato para el composteo.
- 2.- Determinar los cambios producidos como resultado del composteo.
- 3.- Determinar los cambios producidos en la micromorfología del material compostado, como resultado del vermicomposteo en capa delgada.
- 4.- Definir los efectos que la composta y la vermicomposta producen, aplicadas en suelo previamente al cultivo de maíz, sobre las plantas y sobre la materia orgánica del suelo.

HIPÓTESIS

La cascarilla de cacao puede ser transformada a compuestos semejantes al humus mediante vermicomposteo en capa delgada.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1 – El cacao: Características biológicas, aprovechamiento, y componentes susceptibles de humificación.

El Cacao (*Theobroma cacao* L.) se clasifica dentro del Sub-Reino Embriophyta, División Antophyta, Subdivisión Angiospermae, Clase Dicotyledoneae, orden Malvales, suborden Malvinales, Familia *Sterculiaceae*, Tribu Bitneraceae, Género *Theobroma*, especie *cacao* L. (Cronquist 1969; Sánchez 1978; López 1987) La **figura 3.1** es un esquema que representa las principales características de una planta en producción. Originaria probablemente de la cuenca del Amazonas, la especie fue domesticada y cultivada en Mesoamérica (Cuatrecasas 1964), y fue difundida durante los Siglos XVI al XIX hacia las regiones tropicales del mundo (el Caribe, Oceanía, Africa, Asia y Sudamérica), criando por selección natural y artificial las diversas variedades actuales, de las cuales en Tabasco las más cultivadas son Guayaquil, Ceylán y Criollo (Yanes 1994). Se cultiva comercialmente en países africanos y del centro y sur de América, desde 17° al N hasta 23 ° al S del ecuador, a altitudes que van desde los 300 msnm hasta los 1 200 msnm (en Colombia) o los 1 300 msnm (Uganda); en Tabasco algunos cacaotales se establecieron a sólo 16 msnm en Comalcalco. Le favorecen climas con temperatura media anual de 22 a 27 °C y rangos de 18–27 hasta 25–28 °C, precipitación media anual de 1 400 a 2 000 y hasta 2 500 mm (Alvim 1977). En México son los estados de Tabasco y Chiapas los productores más importantes (Yanes 1994).

La planta del cacao es un árbol de 5 a 7 metros, que produce frutos comercializables desde los 5 años (Hernández 1981) o los 3 años (Yanes 1994). Puede propagarse o multiplicarse en forma vegetativa y también reproducirse sexualmente (Chatt 1953; Hernández 1981; López 1987); usualmente se propaga por semilla o por esquejes. Las semillas se obtienen de frutos maduros quitándoles la pulpa y en algunos casos la testa; y se plantan con estaca en su posición permanente, o se desarrollan en almácigo y luego se trasplantan. Los esquejes se sitúan en propagadores hasta que han desarrollado raíz, y cuando las

raicillas han endurecido las plantas se transfieren a almácigos hasta que están suficientemente establecidas para plantarse en el campo. Las plantas jóvenes se desarrollan bajo sombra, y cuando han crecido hasta 60 cm se transplantan al suelo, en su posición definitiva separadas entre sí 2.5 metros a 4.6 metros (4 m en Tabasco según López 1987).

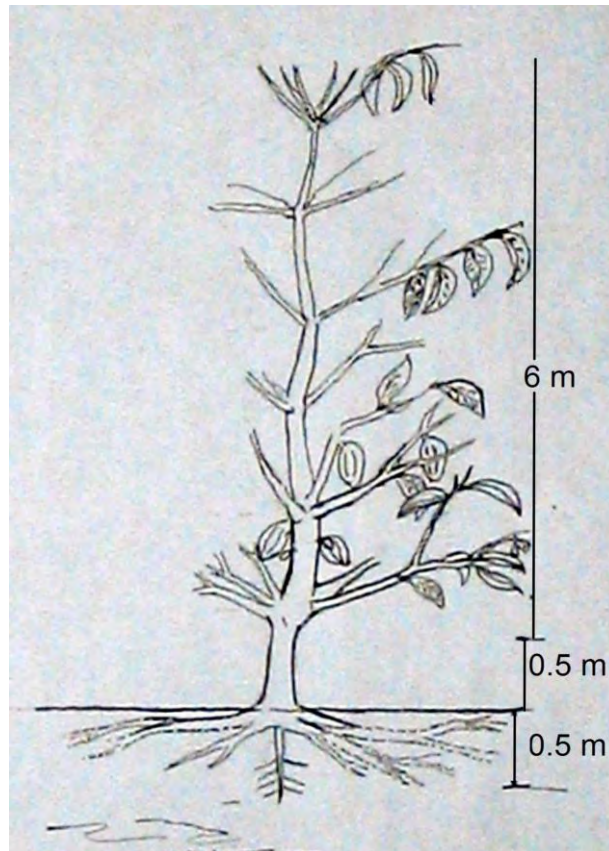


Fig. 3.1 - Esquema de un árbol de cacao (4 años)

Es usual desarrollar un sistema de sombreado para proteger a las plantas pequeñas durante sus primeros 2 a 3 años, usando árboles “madre” de crecimiento rápido que se plantan antes que el cacao, y luego se van cortando alternadamente (aclareo) conforme crecen los árboles de cacao. Los “árboles madre” sirven para reducir el movimiento de aire alrededor de las plantas jóvenes (Cunningham y Burridge 1960), y evitan la tensión por humedad en aquellas (Alvim y Cabala 1974). El sombreado moderado es el método mas seguro y económico para contrarrestar las condiciones desfavorables, y en Tabasco se usan para el sombreado árboles de crecimiento rápido (Maldonado et al. 1997;

López 1987): moté *Erythrina americana* Mill; cocoíte *Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud; chipilcoíte *Dyphysa robinoides* Benth; samán *Pithecellobium saman* (Jacq.) Benth; y cedro *Cedrella odorata* Roem.

Se aprovecha la semilla, para producir manteca de cacao y el extracto, a partir de los cuales se producen el chocolate y sus derivados.

Suelos en los que se desarrolla la planta, inóculo para composteo.

El cacao se ha cultivado sobre varios tipos de suelos. Sustentan mejor este cultivo los suelos con buena retención de humedad, buen drenaje, buena aireación para el crecimiento de la raíz, y una profundidad no menor a 150 cm (Smyth 1966, Alvim y Koszowski 1977). Pueden estar constituidos por arcilla agregada o arena limosa, desde 30 a 40% arcilla, hasta 50% arena, y de 10 a 20 % de partículas de limo (Smyth 1966); su consistencia debe ser suelta y suave (blando cuando seco, friable húmedo, ligeramente adhesivo, de acuerdo con Valencia y Hernández 2002). En ellos el 80% de las raíces absorbentes ocupan los 20 cm superficiales según Alvim (1977). El pH más adecuado es el cercano a neutro, y el porcentaje de materia orgánica debe ser mayor a 3.5 (Alvim 1977). En Tabasco, se cultiva sobre: Vertisoles éútricos, Fluvisoles éútricos y Fluvisoles gleyi-éútricos de la región Sierra, Cambisoles éútricos y vérticos en la región Chontalpa (Palma y Cisneros 1996); en Comalcalco (Triano 1999) las plantaciones de cacao prosperan sobre Fluvisoles éútricos o gleyi-éútricos con 7 a 25% de arcilla, 1 a 30 % de limo, y 48 a 92% de arena.

Tanto en vida de la planta de cacao como cuando ésta muere, los componentes de los tejidos que caen y se incorporan al suelo influyen sobre los microorganismos del suelo, y pueden seguir dos procesos: experimentan mineralización, la cual depende de la naturaleza de los compuestos orgánicos que les integran y de los organismos que participan en ésta; o bien se incorporan al suelo —en formas resistentes a la biodegradación—, lo cual también depende de su composición bioquímica, de los materiales minerales del suelo, y de los propios microorganismos (Kögel-Knabner 1993). Pueden también interactuar con los minerales derivados de las rocas calizas (comunes en el área como material de

origen), y con los minerales amorfos derivados de las cenizas emitidas por el volcán Chichonal en la región de estudio (Lomnitz, 1982; Etienne y Elías, 1982). A esta influencia se agregaría la de las raíces de las plantas cultivadas para cubrir del viento y proporcionar sombra al cultivo: *Erythrina* sp. e *Inga* sp, (Yanes 1994; <http://www.infoagro.com/herbaceos/industriales/cacao.htm>, 2009).

Subproductos de la explotación del cacao que pueden influir sobre el suelo son las hojas, las flores y el fruto, particularmente la “concha” o cubierta externa del fruto maduro. Durante su cultivo en el sureste de México es un procedimiento común dejar que los desechos de las plantas —la hojarasca, ramas pequeñas, flores, frutos dañados— se descompongan en el suelo. El fruto se corta del árbol, se abre, se extraen los granos con la pulpa mucilaginosa que los incluye, y la “concha” se deja en el suelo para que se desintegre y degrade, o bien se quema para incorporar al suelo las cenizas; respecto a usos y reutilización en suelos conviene aclarar la confusión que con frecuencia surge al llamar cáscara a esta “concha”, la cual sí contiene importantes proporciones de nutrientes frente a los que puede tener la *cascarilla*.

Una vez en el suelo, los restos vegetales pueden ser ingeridos y fragmentados principalmente por la edafofauna, pueden ser descompuestos por los microorganismos del suelo, o pueden incorporarse al proceso de humificación, en las complejas interacciones entre metazoarios, microorganismos, las plantas mismas, y las arcillas del suelo. Varios de los componentes de las plantas, de la edafofauna y de los microorganismos son relativamente resistentes a los procesos de degradación, y pueden llegar a formar parte del material que se humifica (Porta *et al.* 2003). Influyen también las raíces del cacao y de las plantas asociadas.

Las raíces de la planta de cacao se desarrollan, en suelos de Tabasco, entre los 30 y los 50 cm de profundidad, alcanzando varios metros de longitud en suelo franco (Yanes, 1994). En ciertas variedades de cacao se han reportado micorrizas endotróficas con ficomicetos, en particular *Acaulospora scrobiculata* (Cuenca y Meneses, 1996).

Los frutos maduros presentan una amplia variedad de compuestos que pueden ser degradados o pueden ser humificados (ver Tabla 3.1); las aportaciones del fruto caído al suelo dependen de la madurez del mismo. En la producción de almendras los rendimientos medios (Alvim, 1977) van de 300 a 500 kg (peso seco) por año, y hasta de 2000 a 3000 en cultivos de alto rendimiento con prácticas culturales mejoradas; en México 1990 eran en promedio de 700 a 800 kg de semilla por hectárea (Yanes, 1994).

Se denomina concha en el fruto maduro al pericarpio (epicarpio y mesocarpio). Constituye un 76% en peso, y su contenido de humedad un 66%. En la madurez ésta llega a contener 1.62% de azúcares totales, 2.48% en compuestos distintos a azúcares (extracto alcohólico), 1.2% de cenizas, 0.05% de almidón; y el material sólido restante es mucílago (Chatt, 1953). La pulpa es una masa mucilaginosa que rodea a las semillas dentro del fruto, cuyo color es blanco o a veces rosado.

El grano de cacao o almendra y el germen son ricos en pigmentos y su color varía del violeta oscuro al pizarroso (Yanes, 1994). Poseen alto contenido en **grasa, almidón, y teobromina**. Contiene también **catequina** —compuesto precursor de taninos y referente de calidad en función de su contenido—. En la Tabla 3.1 se presentan algunos de los componentes más importantes del fruto y la semilla.

Composición de la cascarilla: ¿composteo o humificación?

La cascarilla consta de una epidermis externa, una capa de células parenquimatosas, una de células de esclerénquima (Cronquist 1969) con pared secundaria frecuentemente **lignificada** (Chatt 1953), y una última capa de células con paredes delgadas. El endospermo es una sola capa de células irregulares con **cristales de grasa** y algunos **cristales de oxalato de calcio**. Después de la fermentación, la epidermis está compuesta por células con **gránulos de pigmento color café**, algunas con granos de **almidón** y de **aleurona** dentro de una **masa grasa**, y otras con **cristales aciculares** asociados con **grasa** y protoplasma; y otras con **pigmento violeta o castaño** (Chatt, 1953). Se ha

determinado la composición mineral y los contenidos en vitaminas, polifenoles, alcaloides, azúcares y ácido fítico de la cascarilla (7 variedades) definiendo que los más abundantes eran el ácido cafeico y el ácido 2,3-dihidroxibenzoico (Bonhevi *et al.* 1998).

Tabla 3.1 - Composición de partes del fruto del cacao, en % *

Componente	Cáscara o concha	Granos	Cutículas y pulpa
Agua	83.7	37.1	80 a 88
Albuminoides	0.9	5.75	0.6
Teobromina	0.1	1.1	0.12
Cafeína	Trazas	0.15	0.15
Otros compuestos nitrogenados	0.1	1.06	0.02
Grasa	0.1	29.9	0.4
Sacarosa	0.5	0.1	0.55
Almidón	0.45	4.9	1.1
Astringentes	1.2	4.9	0.25
Sustancias pécticas	1.35	0.11	0.95
“Rojo de cocoa”	0.65	2.25	0.6
Fibra digerible	4.7	4.0	5.65
Fibra de madera	4.3	3.25	1.9
Ácidos libres (cítrico y oxálico)	0.3	0.05	0.5
Ácido acético	0.1	Trazas	Trazas
Ácidos combinados (cítrico y oxálico)	0.7	0.5	0.3
Cenizas Totales	8.81	5.30	
Hierro, como Fe ₂ O ₃	0.01	0.03	0.01
Magnesio, como MgO	0.10	0.38	0.09
Calcio, como CaO	0.04	0.08	0.04
Potasio, como K ₂ O	0.4	0.74	0.22
Sodio, como Na ₂ O	0.05	0.15	0.02
Silicio, como SiO ₂	0.01	0.02	Trazas
Azufre, como SO ₂	0.03	0.06	0.02
Fósforo como P ₂ O ₅	0.09	0.90	0.11
Cloro, Cl	0.03	0.02	0.04

* Modificado de Chatt (1953) y Minifie (1989)

Durante su industrialización, la semilla de cacao se somete a diferentes procesos como son la fermentación, el secado y el tostado, que inducen cambios en las sustancias saborizantes y aromatizantes, e inducen el intercambio entre los cotiledones y la cascarilla. El tostado consiste en un tratamiento con calor para

“abrir la estructura de los productos vegetales y para formar aroma y sabores agradables” (García, 1976) mediante temperaturas menores a los 200 °C: elimina sabores desagradables y humedad y facilita la remoción de la cascarilla, para que el grano pueda ser fácilmente molido. En el aroma y sabor finales intervienen, además de la temperatura y el tiempo, el estado de la semilla fresca, el contenido de humedad, etcétera. Las sustancias que menos cambio sufren son las grasas, los polifenoles y los alcaloides (Minifie 1989).

Los ácidos insaturados en los glicéridos de la mantequilla de cascarilla incluyen 32% de ácido oleico y 8 a 14 % de ácido linoleico; la porción insaponificable contiene isómeros de sitosterol, parafinas, y alfa- y beta- teosterol (Chatt 1953) que puede “fijar” los rayos ultravioleta de manera similar al ergosterol (antirraquítico). El 57.8 % de la proteína total es digerible, pero un tostado fuerte reduce esa digestibilidad.

En términos generales, la cascarilla contiene 10% o más de proteína cruda (Minifie 1989), entre 3.3 y 5.7 de grasa cruda, 15.5 a 26.6 de fibra cruda, y 6.7 a 10.5% de minerales (Yanes 1994). Ya sin grasa, llega a contener 14% de proteína (Minifie 1989), 2.24% de nitrógeno (según Jones *et al.* 1991 es relativamente bajo; el más bajo es 1.80% en desechos de frutas), y 1.18% de fósforo. Abbiola y Tewe (1991) encuentran como componentes principales de la cascarilla: celulosa y hemicelulosa, lignina, y pequeñas cantidades de compuestos fenólicos. No presenta especial interés como alimento humano debido a su alto contenido en celulosa, mayor de 28% en la variedad Acera (Abiola y Tewe 1991). La cascarilla tiene también 5.9% de pectina y 4.5% de ácido péctico en base seca libre de grasa, y no contiene almidón (Chatt 1953).

El contenido mineral de la cascarilla (Tabla 3.2) está entre 5.3 y 10.7% o hasta 15.3% (Abiola y Tewe 1991, en el cacao tipo Amazonas Forastero). Bonvehi y Jordá (1998) reportan los contenidos minerales de muestras de cascarilla de semillas sin tostar, de Brasil, Colombia, Ecuador, Camerún, Costa de Marfil, Guinea y Nigeria (cromatografía líquida de alta resolución HPLC) cuyas medias en

g·100 g⁻¹) son: P = 0.69, Ca = 0.33, Mg = 0.93, K = 1.63, y en mg·kg⁻¹, Cr = 8.33, Cu = 43.1, Zn = 49.5, Fe = 566, Na = 903.

Tabla 3.2 - Componentes de los cotiledones y de la cascarilla del cacao

Componente	Cotiledones no fermentados		Cotiledones fermentados		% de material sólido (sólidos totales = 76%)		g·100g ⁻¹ o % *
	Porcentaje en el material original	% en peso seco libre de grasas	Porcentaje en el material original	% en peso seco libre de grasas	Almendra libre de grasas	Cascarilla tostada	
Agua	3.65	–	2.13	–			6.72 *
Grasa	53.05	–	54.68	–		53.0	10.7 *
Fibra cruda							43.9 †
CENIZAS					5.30	8.81	9.3 a 11.9*
Totales	2.63	6.07	2.74	6.34		5 a 8	10.7*
Solubles en agua	1.02	2.36	1.25	2.89	2.30	3 a 5	
Insolubles en agua	1.61	3.72	1.49	3.45	3.00	3.71	
Arena, etc.	0.05	0.12	0.05	0.11		1 a 1.8	
Alcalinidad como K ₂ O	0.51	1.18	0.41	0.95	1.66	5.48	1.63*
Cloruros	0.012	0.028	0.014	0.032	0.058	3.4	
Hierro (Fe ₂ O ₃)	0.004	0.009	0.007	0.016	0.004	0.035	
Ácido Fosfórico (P ₂ O ₅)	0.96	2.22	0.60	1.39	1.76	0.013	0.69*
Cobre	0.0024	0.0055	0.0028	0.0065		1.18	
NITROGENO							
Nitrógeno total	2.28	5.27	2.16	5.00		2.24 a 2.63	
Nitrógeno de proteínas	1.50	3.46	1.34	3.10			
Nitrógeno de amonio	0.028	0.065	0.042	0.097			
Nitrógeno de amidas	0.188	0.434	0.336	0.778			
Teobromina	1.71	3.95	1.42	3.29		1.71	1.06*
Cafeína	0.085	0.196	0.066	0.152			0.11*
CARBOHIDRATOS							
Glucosa	0.30	0.69	0.10	0.23			1.11*
Fructosa							0.56*
Sacarosa	tr.	tr.	tr.	tr.			tr.*
Almidón (método takadiastasa)	6.10	14.09	6.14	14.22			0.69*
Pectinas	2.25	5.20	4.11	9.52		5.9	
Fibra	2.09	4.83	2.13	4.93		16.75	
Celulosa	1.92	4.43	1.90	4.39	3.16	28.15	
Pentosanos	1.27	2.93	1.21	2.80			
Mucílago y Gomas	0.38	0.88	1.84	4.26			
TANINOS							0.11*
Acido tánico (met.Lowenthal)	5.30	12.26	4.16	9.63			
Púrpura cacao y pardo cacao	5.30	12.26	4.16	9.63			
ACIDOS							
Acético (libre)	0.014	0.032	0.136	0.315			
Oxálico	0.29	0.67	0.30	0.70			
Cítrico					0.29	0.10	
EXTRACTOS							
Agua fría	15.28	35.28	12.29	28.46			
Alcohol	16.80	38.80	9.67	22.39			
LIGNINA (HCl)					24.9	29.0	
LIGNINA (H ₂ SO ₄ 72%)					22.0	24.3	

Knapp 1937; Winkler 1935 in Chatt 1953, p. 113. Datos respecto a la cascarilla, Chatt 1953, Minifie 1989, * Bonvehi y Jordá 1998 g/100 g, HPLC; † Abbiola y Tewe 1991.

Entre los constituyentes volátiles del aroma (Silwar 1988) se encontraron diez compuestos cuyo contenido está entre 1 y 40 mg·kg⁻¹, y cerca de 90 compuestos cuyo contenido está dentro del rango 10 a 500 µg·kg⁻¹; los principales son el 2-fenil-acetaldehído, la tetrametil pirazina, el benzaldehído, 2-fenil-etanol, y el ácido isovalérico; otros compuestos comunes fueron hidrocarburos, aldehídos, cetonas, ácidos, ésteres, furanos y pirazinas.

Así, la cascarilla presenta una proporción relativamente elevada de minerales (cenizas), y cerca de una quinta parte de ligninas que son una base estructural para la formación de sustancias húmicas (Stevenson 1994), así como celulosa y hemicelulosa, y pequeñas cantidades de compuestos fenólicos que también pueden intervenir en la formación de sustancias húmicas, como se verá en el capítulo sobre “la relación entre las sustancias húmicas y el cacao”.

Microorganismos del suelo asociados al cultivo de cacao que pueden afectar el composteo de la cascarilla.

Aunque los componentes de la cascarilla como subproducto resultan algo distintos a los de los tejidos naturales de la planta, es más probable encontrar los microorganismos capaces de atacar estos compuestos en el suelo de los plantíos de cacaotal, de acuerdo con el principio microbiológico general referente a la abundancia de sustancias naturales que favorecen a los microorganismos asociados a ellas. A continuación se presenta un resumen referente a los que pueden estar presentes, reelaborado de: Chatt (1953); Haug (1980); Mustin (1987); Millar (1993). Algunos de estos microorganismos pueden participar en el proceso del composteo de la cascarilla de cacao.

Entre las especies que fermentan la pulpa que envuelve a la semilla del cacao, han sido registradas: *Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces theobromae*, *Saccharomyces elipsoideus*, *Saccharomyces apiculatus*, *Saccharomyces anomalus*; *Eutorulopsis theobromae* a través de toda la fermentación; *Endomyces anomalus* (*S. anomalus*), *Klockeria domingensis*, *Klockeria cacaoicola* (subespecie de *S. apiculatus*) en las fases iniciales, y *Saccharomyces elipsoideus*, *Saccharomyces elipsoideus* var. *domingensis*,

Saccharomyces bussei y *Torulopsis lilienfeld-toallii* en las fases tardías. Durante la fermentación acética predominan bacterias del ácido acético *Acetobacter xylinum*, *A. ascendens*, *Bacterium xylinoides* y *B. orleanense*. Además entre las bacterias presentes cuando hay fermentación está *Bacillus subtilis*.

Los “mohos” pueden contaminar el cacao cuando no hay suficiente aireación durante la fermentación de los granos. Los más comunes son Aspergillales que, favorecidos por las temperaturas entre 37 °C y 45 °C, dañan al color y al sabor de los productos finales. *Aspergillus fumigatus* ataca la cascarilla y abre la entrada a otros hongos dentro de la almendra: *Penicillium spp.*, *Aspergillus niger*, *Pseudo-absidia vulgaris*, *Aspergillus glaucus*, *Penicillium glaucum*, *Oidium lactis*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus tamarii*, *Mucor spp.*, *Cymomucor buntingii*. En las cáscaras o conchas se encontraron tómulas y mohos de los géneros *Monilia* y *Oospora*, levaduras no esporuladas, y bacterias semejantes a especies de *Flavobacterium*, *Achromobacter* y *Proteus*, dependiendo de la temperatura a la cual se iniciara y mantuviera la fermentación, siempre sobre los 25 °C que les señala como marcadamente adaptados a condiciones tropicales (Chatt, 1953). Al desarrollar el composteo de cascarilla en pilas, estos microorganismos aparecerán si el proceso es inadecuado.

Están identificados como mixomicetos y hongos que participan en el composteo (Haug 1980, Mustin 1987, Miller 1993) los siguientes:

SIPHOMYCETES (sin septos): Myxomicetes (*Myxococcus*), Myxomicetales y Acrasiales. Chytridiales, Blastocladales, parásitos de células o en restos orgánicos muy húmedos. Monoblepharidales donde los suelos son húmedos. Oomycetes: Peronosporales. *Albugo*, *Pythium*, *Plasmopara* (mildiu de la vid), *Phytophthora* (presentes en los suelos y compostas, parásitos de plantas).

EUMYCETES, SEPTOMYCETES (hongos septados):

Zygomycetes (septados en ocasiones al final de su desarrollo) numerosos mohos presentes en todos los substratos vegetales antes del composteo; importantes en la descomposición de los almidones y celulosas: *Absidia sp.*, *Absidia*

ramosa; *Mortierella turficola*; *Mucor michei* (40 a 45 °C), *Mucor pusillus* (40 °C), *Mucor sp.* (40 a 50 °C); *Rhizomucor sp.* *Rhizopus sp.*

Ascomycetes: Protoascomycetes (levaduras) *Lipomyces* (levaduras con esporas), *Candida*, *Torula*, *Rhodotorula*, *Cryptococcus*, *Torulopsis* (levaduras sin esporas o falsas levaduras). Euascomycetes: (mohos) *Penicillium*, *Sclerotinia*, *Bothrytis*, *Fusarium*, *Trichoderma*, *Oidium*; *Allescheria terrestris*; *Chaetomium thermophilum* (50 °C); *Dactylomyces crustaceus*; *Myriococcum albomyces*; *Talaromyces (Penicillium) dupontii*, *Talaromyces emersonii*, *Talaromyces thermophilus*; *Thermoascus aurianticus*; *Thielavia thermophila*, *Thielavia terrestris*.

Basidiomycetes: *Coprinus lagopus*, *Coprinus sp.*, *Lenzites sp.*

Deuteromycetes (hongos imperfectos): *Aspergillus fumigatus*; *Humicola grisea*, *Humicola insolens*, *Humicola lanuginosa* (50 °C), *Humicola stellata*; *Sporotrichum thermophile*; *Malbranchea pulchella*; *Scytalidium thermophilum* (antes *Torula thermophila* 45 °C).

Mycelia sterilia: *Papulaspora thermophila*.

Respecto a los efectos directos de la planta de cacao sobre los hongos, se ha encontrado que extractos del tronco de cacao (Brownlee et al. 1990a) o de brotes de flores (Brownlee et al. 1990b), ejercen un efecto inhibitor sobre la germinación de basidiosporas de *Crinipellis pernicioso*, parásito de plantas. Pero también se han reportado micorrizas endotróficas con ficomicetos, en particular *Acaulospora scrobiculata* en ciertas variedades de cacao (Cuenca y Meneses, 1996). En la cascarilla sometida a composteo en Tabasco, Jiménez (2006) sólo encontró *Coprinus lagopus*.

Como se verá más adelante, los hongos contribuyen con algunos de sus productos a la formación de sustancias húmicas en los suelos.

3.2 – Las sustancias húmicas y su relación con el cacao.

Para definir si los componentes de la cascarilla de cacao pueden transformarse en materia orgánica de naturaleza húmica con relativa facilidad, es conveniente conocer previamente las propiedades de las sustancias húmicas y su compleja composición.

El humus puede definirse como el constituyente orgánico de la fase sólida del suelo, formado en parte por las sustancias húmicas, y en parte por moléculas de origen biológico con estructura específica. Hayes (2006) resume la definición del humus de los suelos como la materia orgánica no viviente que resulta de la transformación (humificación) de desechos orgánicos, cuyos constituyentes presentan resistencia a la biodegradación. Las *sustancias húmicas* presentan estructura molecular compleja y no específica, predominantemente aromática, anfífilas y de reacción ácida, de color oscuro y elevado peso molecular (de unos cientos a varios miles de Dalton), relativamente estables frente a la biodegradación (Schnitzer y Khan 1978; Porta et al. 1999), que contienen cantidades significativas de nitrógeno, presentan color ámbar a pardo oscuro, y se encuentran en todos los ambientes (Hedges 1988), pues están involucradas en muchos procesos en los suelos y en las aguas marinas y continentales (IHSS, 2007).

Origen del humus.- Se reconoce como precursores del humus a compuestos orgánicos resistentes a la descomposición microbiana: ciertos residuos de plantas, ciertos residuos animales, y algunos productos microbianos (Stout et al. 1981). La materia orgánica del suelo se considera constituida por dos grandes compartimentos: una fracción en general minoritaria y lábil, que es afectada por las prácticas de cultivo, y una fase mayoritaria y estable que resulta de los procesos formadores de suelos. La fracción lábil consiste en compuestos orgánicos simples (azúcares, aminoazúcares, ácidos orgánicos y aminoácidos) fácilmente utilizados por los microorganismos del suelo, con pérdida cercana al 60 % del C en el primer año. La fracción estable se forma a partir de los compuestos complejos en los residuos de las plantas, los cuales son en parte metabolizados

por los microorganismos y en parte transformados a humus mediante síntesis microbiana, o bien sufren transformaciones abióticas (Stout et al. 1981). La proporción del carbono que es retenida por el suelo en cada caso, depende mucho del material vegetal (trigo, paja, maíz, césped, centeno) y de las condiciones climáticas; los residuos estabilizados y los productos que se reciclan tienen vida media, por ejemplo, de 5 a 6 años que reflejan la rapidez con que se incorporan al suelo.

La macromolécula más estable entre los constituyentes celulares de las plantas es la **lignina**, cuya tasa de degradación es un tercio la de la celulosa, ya que presenta una estructura aromática compleja, constituida por unidades de fenilpropano con cadenas laterales hidroxil-alifáticas o carboxil-alifáticas. También son resistentes a la descomposición las grasas, las ceras y las resinas, los polifenoles, algunos pigmentos (carotenoides, clorofilas), y las proteínas vegetales —cuando quedan protegidas de los microorganismos porque interactuaron con otras sustancias orgánicas (taninos, ligninas, sustancias húmicas) o con minerales de arcilla (Schnitzer 1978).

Existen dos teorías clásicas que explicaban la formación de las sustancias complejas del humus: la teoría de la **lignoproteína**, y la teoría de los **polifenoles**. Waksman e Iyer en 1932 proponen la teoría de la **lignoproteína**: las sustancias húmicas son producto de ligninas poco modificadas en su estructura, que reaccionan con proteínas formando complejos lignoproteicos resistentes al ataque microbiano. En cambio, la teoría de los **polifenoles** considera que el humus se forma en varias etapas: primero todos los componentes vegetales se descomponen a monómeros simples, que luego se polimerizan hacia los polifenoles, macromoléculas de alto peso molecular de color castaño (Stout et al., 1981). Los polifenoles pueden también derivar de la lignina o de los flavonoides por síntesis microbiana.

Flaig et al. (1975) establecieron una secuencia de reacciones que parten de la lignina y resultan en ácido húmico: a) la lignina se libera durante la descomposición de los residuos vegetales; b) la lignina sufre ruptura oxidativa,

hacia unidades estructurales primarias; c) dichas unidades se oxidan y desmetilan dando lugar a polifenoles que a su vez son oxidados a quinonas; y d) durante su oxidación, las quinonas se polimerizan y se unen con compuestos nitrogenados (p. ej. aminoácidos) formando así las macromoléculas de color oscuro.

Los residuos animales resistentes a la descomposición incluyen quitina y queratina, asociadas además en forma natural a compuestos que les hacen más resistentes (ceras, parafinas, glucanos, melaninas, cutinas y suberinas, y el complejo lipoproteína-quitina). Son componentes de los exoesqueletos animales: mayormente la quitina, un polímero de la acetilglucosamina, en los artrópodos, en quistes de nemátodos, en algunas algas, y en paredes de células fúngicas; y la queratina en los vertebrados, componente mayor de la piel y sus anexos (Stout et al. 1981).

Los microorganismos y la microfauna del suelo aportan materia orgánica constituida por sustancias resistentes (esclerocios, clamidosporas, endosporas, quistes) que pueden preservarse al formar complejos con el humus del suelo. Por ejemplo, determinados polisacáridos de paredes celulares o extracelulares microbianos (estudiados principalmente por Martin, de 1955 a 1974 –Stout et al. 1981) unen partículas del suelo en agregados que les protegen de la descomposición, o bien son adsorbidos en la superficie de las partículas de arcilla, o también forman complejos polisacárido-metálicos, de manera que inhiben la actividad de las enzimas extracelulares del suelo o hacen menos solubles a los polisacáridos.

También ha sido descrita la importancia de reacciones que tienen lugar al morir las células vegetales o microbianas, cuyas enzimas autolíticas generan radicales libres a partir de los restos celulares: reacciones de las quinonas, los grupos amino de los aminoácidos, de los péptidos, de los aminoazúcares y de los polisacáridos tienen unidades de aminoazúcares (Haider et al. 1975). Los hongos y otros microorganismos pueden originar unidades fenólicas por biosíntesis a partir de compuestos de carbono no aromáticos.

Los ácidos húmicos de suelos son más ricos en nitrógeno con 0.8 a 4.3%, seguidos por los ácidos fúlvicos con 0.9 a 3.3 % y por la humina 1% de N (Stevenson 1994) Los ácidos húmicos acuáticos tienden a ser más ricos en oxígeno, más pobres en carbono y en nitrógeno que los ácidos húmicos de los suelos, mientras que los ácidos fúlvicos acuáticos son más ricos en C y N que los de los suelos (Senesi et al. 1989).

Se han propuesto más vías de humificación, como son las reacciones de Maillard, que implican la condensación de aminoácidos con azúcares reductores, y dan lugar a macromoléculas de color pardo a través de varios pasos:

- a) apertura del anillo del azúcar;
- b) formación de una aldósil-amina;
- c) reorganización a un ceto-derivado;
- d) deshidratación y fragmentación del producto dando lugar a varios intermediarios insaturados;
- e) polimerización de los intermediarios para formar oligómeros y macromoléculas de color castaño (Stout et al. 1981).

Formación de complejos arcilla-humus.- En el suelo existen unidades básicas de microagregados constituidos por arcilla, metales polivalentes y materia orgánica que se asocian formando microagregados menores a 250 μm en diámetro (Edwards y Bremner 1967). En éstos es mayor la proporción de materia orgánica asociada con la fracción de arcilla gruesa (2.0 a 0.2 μm) que la asociada con arcilla fina (menor a 0.14 hasta 0.08 μm). Conforme es mayor el tamaño de la partícula del complejo arcillo-orgánico, son mayores los contenidos totales de carbono y nitrógeno, y es menor la proporción C/N. Anderson et al. (1974) obtuvieron mediante dispersión ultrasónica del residuo de una extracción con álcali y pirofosfato, una fracción de ácido húmico asociada a la arcilla, lábil y débilmente humificada, de alto peso molecular, de sustancias húmicas alifáticas, poco condensadas, ricas en nitrógeno. McGill y Paul (1976) encontraron que una mayor proporción del N es estabilizada por sesquióxidos, más que retenida conjuntamente con la arcilla.

Stout et al. (1981) resumieron que el sistema suelo adsorbe moléculas grandes (p. ej. polisacáridos) en la montmorillonita, y forma complejos al reemplazar (en los sitios de intercambio) los cationes orgánicos a los cationes inorgánicos, como al protonar las bases orgánicas en la superficie de la arcilla, y aún por reemplazo del agua o del líquido orgánico intercalado; la adsorción ocurre al asociarse metales polivalentes en la superficie de la arcilla involucrando reacciones de “intercambio de ligandos” y de intercambio. La afinidad del ácido húmico hacia la arcilla (saturada con el catión) aumenta en el orden $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Cs}^+ = \text{Ba}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Zn}^{2+} < \text{Co}^{2+} < \text{Cu}^{2+}$ y $\text{La}^{3+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+}$ (Martin et al. 1966). Son fuertemente adsorbidos por los minerales de arcilla los fosfatos de inositol y sus derivados, los fosfatos de hexosa y los glicerofosfatos, que aumentan así su resistencia al ataque microbiano.

Boyd y Mortland (1990) revisaron los trabajos relativos a las interacciones entre enzimas y complejos organominerales: las enzimas son adsorbidas principalmente por las esmectitas ($1.0 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$), y por vermiculita ($0.2 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$), illita ($0.2 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$) y caolinita ($0.02 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$). En las esmectitas, la adsorción es mayor alrededor del punto isoeléctrico de la proteína, y depende de qué catión se asocie inicialmente a la esmectita conforme al orden $\text{H}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$. Los minerales de arcilla illita y caolinita adsorben sólo en la superficie. En la caolinita la adsorción tiene lugar por mecanismos de intercambio de iones, y es dependiente del pH.

Las arcillas y la materia orgánica sirven como superficies adsorbentes de enzimas y de proteínas (Boyd y Mortland 1990), y la actividad de las enzimas cambia debido a la influencia de propiedades de superficie de la arcilla, y también debido a que la catálisis ocurre en la interfase mineral-solución: el pH óptimo es desplazado hacia valores más alcalinos en una o dos unidades. La estabilidad aumenta conforme es mayor la cantidad de enzima adsorbida; la actividad y la cinética en unos casos aumentan (glucosa oxidasa en arcillas; catalasa en esmectitas) y en otros disminuyen. La resistencia a la degradación en el complejo arcilla-substrato-enzima (lisozima) es mayor en la esmectita y en la caolinita. En otros casos, la degradación se ve reducida debido a que la accesibilidad entre enzima y substrato adsorbidos en las arcillas es menor que en las soluciones. En

los complejos esmectita–proteína, la posibilidad de que las proteínas sean degradadas disminuye conforme el espacio basal y el agua dentro de la arcilla disminuyen.

En la humificación también influye el *tipo de arcilla*. Las esmectitas y las vermiculitas poseen un gran número de sitios de intercambio (Borchardt 1977). Las esmectitas son extremadamente reactivas en los ambientes edáficos y adsorben compuestos orgánicos naturales, herbicidas y pesticidas; abundan en los suelos moderadamente intemperizados, con medios pobremente drenados y pH sobre el neutro (planicies aluviales, Vertisoles, suelos inundados con depósitos de ceniza volcánica, cuencas pobremente drenadas, y bajo rocas básicas), ambientes con potenciales elevados de silicio y de cationes básicos.

En la zona de Tabasco en la cual se desarrollaron los experimentos, el material de origen de los suelos lo constituyen rocas sedimentarias del Cretácico, cuyo contenido en esmectitas puede ser elevado: en general, las cantidades relativas de estos minerales en las rocas sedimentarias siguen una serie Plioceno= Mioceno > Oligoceno > Pérmico > Pensilvánico = Missisipico = Ordovícico > Eoceno = Cretácico superior > Jurásico > Triásico > Cretácico inferior > Silúrico (Borchardt 1977). Las temperaturas elevadas contribuyen a la formación de montmorillonita, la cual se forma 500 veces más a 100 °C que a 0 °C (Borchardt 1977). Las planicies aluviales son comunes en la región que se estudia, la provincia Llanura Costera del Golfo (Tabasco), y de acuerdo con INEGI (1986), se encuentran areniscas del Mioceno en 29 puntos de las planicies aluviales que corresponden a dicha provincia. Puede señalarse entonces que resultan favorables a la humificación, en ciertos suelos de Tabasco, el material parental, el clima y las arcillas.

De acuerdo con Mustin (1987) las características del complejo arcillo-húmico pueden resumirse en los siguientes puntos:

- El humus y las arcillas son hidrófilos y retienen muchas veces su peso en agua. El humus puede absorber mucha más agua que las arcillas expandibles, pero se humedece más lentamente;

- El humus y las arcillas son, en general, coloides electronegativos. Los componentes de las sustancias húmicas suelen tener una capacidad de intercambio de cationes 3 a 5 veces más grande;
- El humus y las arcillas del suelo, aunque son electronegativos, se asocian en un mismo complejo gracias a los cationes e hidroxilos ligantes;
- El humus aminora el efecto desfavorable de las arcillas sobre la estructura del suelo, pues lo protege de la dispersión; las arcillas protegen al humus haciendo más lenta la mineralización y favoreciendo la humificación.

Formación de complejos órgano-húmicos.– Las enzimas presentes en el suelo pueden interactuar con la materia orgánica aún atrapadas en compuestos húmicos o en complejos arcillo-húmicos, o ligadas por uniones hidrógeno, o por uniones covalentes de la enzima con sustancias húmicas (Burns 1978). En suelos de bosques se han encontrado “complejos enzima-humus” constituidos por ureasa, difenol oxidasas, proteasas e hidrolasas, resistentes al ataque proteolítico y estables a temperaturas elevadas. Las enzimas también pueden estar asociadas con la materia orgánica mediante interacciones no polares, mostradas con pesticidas, péptidos, con cationes orgánicos como enzimas, en la interacción entre residuos hidrofóbicos de enzimas y la superficie hidrofóbica del complejo arcilla-humus y con compuestos orgánicos en general (Boyd y Mortland 1990).

La estabilidad de los compuestos orgánicos en los suelos es mayor conforme son mayores la saturación con agua, la desecación, las temperaturas son más bajas, son más abundantes los factores tóxicos, más alta concentración de sales, donde el pH muy bajo o muy elevado es desfavorable a la descomposición, si están ausentes los factores de crecimiento microbianos y si están ausentes los organismos que contribuyen a la trituración de la materia orgánica. Los compuestos orgánicos se encuentran protegidos cuando están recubiertos por otras sustancias orgánicas (ceras, lignina, melaninas, sustancias húmicas) o inorgánicas (sílice, sesquióxidos, óxido de manganeso, cal). Su persistencia en los suelos se ve favorecida cuando presentan un tamaño molecular grande, una condensación desordenada, cuando presentan una

estructura macromolecular condensada con numerosos tipos de puentes intramacromoleculares, cuando son fácilmente atrapados entre capas moleculares, y cuando inactivan enzimas o se rodean de cationes metálicos (Swaby 1968). Stout *et al.* (1981) señalan que la persistencia de la materia orgánica del suelo está asociada a condiciones bio-físico-químicas que determinan su acumulación: sequedad o saturación, unión estrecha con las arcillas finas o los metales, dificultad para la descomposición de ciertas estructuras moleculares, y en forma compleja se asocia a la diversidad microbiana como factor decisivo.

En cuanto a las sustancias húmicas, Schnitzer y Khan (1972) postularon dos, ácidos fúlvicos y ácidos húmicos:

- Los ácidos fúlvicos (AF) estarían integrados por unidades básicas de ácidos fenólicos y bencenocarboxílicos unidos por puentes de hidrógeno para formar una estructura polimérica estable, aunque suficientemente flexible para atrapar sustancias orgánicas (alcanos, ácidos grasos, péptidos, ftalatos de dialquilo, carbohidratos, pesticidas), iones y óxidos metálicos inorgánicos
- Los ácidos húmicos (AH) presentarían un mayor tamaño molecular y grado de condensación. Las sustancias húmicas se forman en ambientes muy diferentes aunque presentan propiedades similares (Schnitzer 1977): su estructura es macromolecular, con anillos aromáticos de di- o tri-hidroxifenoles con puentes de $-O-$, $-CH_2-$, $-NH-$, $-S-$, y otros grupos, y con dobles enlaces de quinonas, radicales libres estables y grupos OH y COOH libres.

Mustin (1987) resume que la humificación comienza en los suelos con la hidrólisis de proteínas hacia péptidos y aminoácidos, y con la hidrólisis de los polisacáridos a azúcares simples y de los lípidos a ácidos grasos. Todos aquellos sirven de substrato a los microorganismos que atacarán también las moléculas más resistentes de las paredes celulares vegetales, producirán lisis de esas paredes y degradación de las ligninas y de los taninos. Estas sustancias presentan el carácter de precursores de las sustancias húmicas, esencialmente

los de naturaleza aromática, y su evolución progresa mediante una secuencia de interacciones químicas y bioquímicas (en las cuales dominan polimerizaciones y policondensaciones) que conducen a la síntesis de productos orgánicos complejos y coloreados, macromoléculas orgánicas más estables. Entran en juego los glúcidos simples, los polifenoles y los compuestos nitrogenados cuya influencia es determinante para la composición futura del humus, que se origina a través de cuatro procesos generales:

a) la **alteración vegetal**, en la cual las fracciones más resistentes a la degradación por los microorganismos –como las ligninas y los taninos– son precursoras del humus, con gran influencia del material vegetal inicial;

b) la **polimerización bioquímica**, en la cual moléculas orgánicas sencillas y minerales sirven de sustrato a los microorganismos, los cuales sintetizan productos de su metabolismo y compuestos simples que polimerizan en el suelo hacia compuestos húmicos, de tal forma que en este proceso la influencia de la naturaleza de la materia orgánica inicial es casi nula;

c) la **autólisis celular** por la que sustancias húmicas se generan a consecuencia de la autólisis de células (vegetales y animales) senescentes, cuyos compuestos se condensan y se polimerizan originando sustancias húmicas;

d) la **síntesis microbiana**, a través de la cual ciertos tipos de microorganismos sintetizan macromoléculas similares a las sustancias húmicas, y las excretan en el medio o las liberan después de morir.

Se puede considerar que todos estos procesos funcionan simultáneamente. En ellos hay puntos comunes: a) las interacciones con el medio, b) la humificación determina la formación de sustancias macromoleculares, AH que serán luego reorganizados y re-degradados hacia AF o hacia humina; y c) durante estos procesos tienen lugar interacciones fundamentales entre la materia orgánica y las partículas minerales (arcillas). El humus, relacionado con la descomposición de los desechos orgánicos vegetales y animales, se incorpora íntimamente a las otras fracciones del suelo; el conjunto de sus componentes adquiere mayor capacidad para retener el agua y para nutrir a las plantas (Theng *et al.* 1989).

Varias de las condiciones revisadas como favorables a las arcillas más reactivas y que adsorben más materia orgánica se encuentran en la región sureste de México. En Tabasco las rocas más antiguas que afloran son rocas sedimentarias que datan del Cretácico superior (INEGI 1986), y como material de origen tendrían un quinto lugar entre las favorables a la formación de arcillas. La región está entre las más lluviosas del país, manteniendo la humedad elevada necesaria para la humificación. Numerosos yacimientos petrolíferos afloran a la superficie en las planicies aluviales de la región. Ha recibido las cenizas de un volcán activo, el Chichonal (Silva y Cochemé 1982). Insolación, agua y arcillas son la base de una elevada productividad en los ecosistemas de esta región. A estos factores se suma la humificación, favorecida por los regímenes de humedad del suelo, la variedad y riqueza de los desechos vegetales, de los desechos animales y de los microorganismos que degradan la materia orgánica en él.

El humus según las técnicas para su estudio. – Los componentes del humus fueron definidos inicialmente a partir de los métodos de laboratorios que se utilizan para su extracción, fraccionamiento y purificación. La extracción, primera etapa de separación física, consiste en colocar la tierra fina de un suelo (fracción inferior a 2 mm) en un medio líquido para luego separar por diferencia de densidad dos fracciones de la materia orgánica total (fraccionamiento densimétrico): una fracción sobrenadante denominada *materia orgánica libre*, y una fracción en el sedimento conteniendo la materia orgánica unida a los constituyentes minerales denominada *materia orgánica ligada*. En la práctica, lo que se denomina humus está contenido en la materia orgánica ligada, y hay que extraerla de las fracciones minerales, usando para ello el hidróxido de sodio diluido en agua (NaOH 0.1 M). El procedimiento se representa en la Fig. 3.2.

Mediante dichas operaciones se obtienen las tres fracciones consideradas como los constituyentes del humus:

- la HUMINA (Hu), insoluble en álcali;
- los ACIDOS FULVICOS (AF);

- los ACIDOS HUMICOS (AH).

En las técnicas de análisis, las condiciones del medio y del modo de análisis influyen mucho en los resultados, pues los AF tienen pesos moleculares inferiores en relación con los de los AH y la humina, y todas estas sustancias están fuertemente polimerizadas y policondensadas. La proporción de las fracciones húmicas encontradas en un suelo varía según el pH, la actividad iónica de la solución, la temperatura, y, por supuesto, el método de extracción.

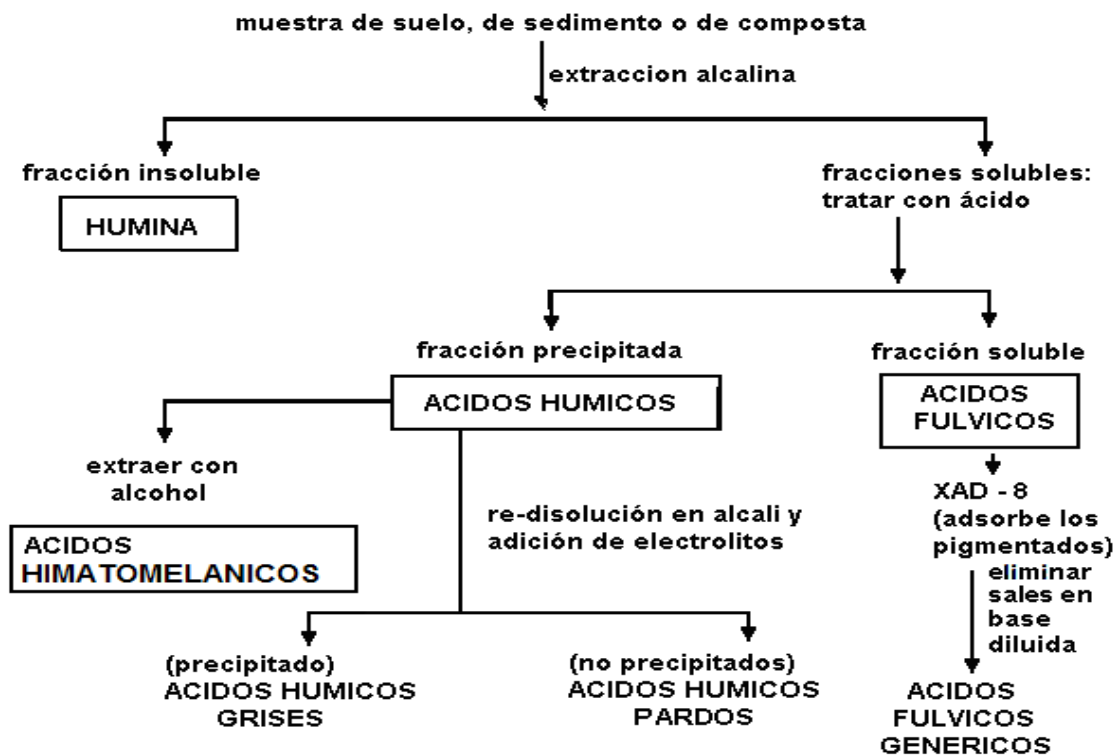


Fig. 3.2 – Extracción de fracciones constituyentes del humus basada en su solubilidad (Stevenson 1994).

En el estudio de las sustancias húmicas de varios suelos Almendros et al. (1979) mencionan varias fracciones. En la **materia orgánica libre** se aprecian efectos de acción biodegradativa e inicio de la humificación en los residuos vegetales, y su aspecto es característico en cada tipo de suelo: los fragmentos menos evolucionados son restos tisulares, y los restos más antiguos forman masas amorfas (sin estructura organizada) de color más oscuro, que son

portadoras de compuestos de naturaleza húmica, y dependen de la vegetación que el suelo sustenta. Los **extractos húmicos** en suelos de gley —rizogénicos— y en suelos pardos —oscuros, amorfos y finamente divididos, resistentes a la biodegradación— presentan una relación AF/AH siempre menor que 1, sin correlación con los extractos de la fracción pesada, y evolucionan en forma independiente respecto al material vegetal original. Las **huminas extraíbles**, formadas por AH fuertemente asociados a la arcilla y a los óxidos de hierro-aluminio mediante enlaces, son las más polimerizadas y con los más altos valores de hidrógeno; unidas a las arcillas y a los óxidos de Fe y Al, presentan cierta correspondencia directa respecto a los contenidos en arcilla. Las **huminas heredadas** son, en su mayor parte, partículas con ligninas poco modificadas, retenidas fuertemente por enlaces a los agregados (separables por ultrasonido), y su proporción en el suelo es ya independiente de la cantidad de restos vegetales incorporados inicialmente. Una parte de los AH se denomina **huminas de insolubilización**, cuyo origen es la materia vegetal solubilizada que formó complejos insolubles con ciertos cationes y experimentó polimerización progresiva, por procesos de neoformación biofísico-químicos (parcialmente microbianos por acción enzimática). La **humina microbiana** proviene de neoformación debida a la actividad de los microorganismos y de su hidrólisis ácida (polisacáridos, poliurónidos, aminoazúcares, etc.). Y la **humina evolucionada por maduración** está constituida por compuestos aromáticos fuertemente policondensados, pobres en grupos funcionales y totalmente insoluble en los reactivos extractantes habituales.

Los AH, de acuerdo con los modelos más clásicos, presentan estructura desordenada con núcleos aromáticos poco condensados, trama exterior laxa y menos condensada; junto con las huminas parecen tener un “núcleo” formado por compuestos diferentes niveles de estructuras aromáticas, de las cuales parten cadenas alifáticas y probablemente diversos compuestos orgánicos (glúcidos, proteínas y polipéptidos, ácidos urónicos, etc.). Por degradación oxidativa de las sustancias húmicas se obtienen, como productos principales, compuestos alifáticos y compuestos fenólicos en diferentes proporciones dentro de los AH y

los AF. En las fracciones húmicas purificadas dominan los compuestos aromáticos (70% del total de la fracción húmica). Entre las fracciones AH, AF y humina, ésta última presenta mayor aromaticidad mostrando una polimerización mayor.

Otros compuestos orgánicos asociados con fracciones del humus pueden originarse a partir de los microorganismos, la edafofauna y las plantas; a partir de derivados metabólicos excretados durante la degradación de la materia orgánica fresca; y a partir de la mineralización de las fracciones húmicas (AF principalmente). Pueden ser glúcidos, sustancias orgánicas nitrogenadas, fosfatadas o sulfuradas (proteínas, polipéptidos, ácidos aminados, ácidos nucleicos). Los glúcidos encontrados en los suelos son azúcares simples (pentosas y hexosas), azúcares complejos (oligosacáridos, polisacáridos, mucopolisacáridos, azúcares aminados o hexosaminas, azúcares-alcoholes como manitol y sorbitol, y azúcares con grupos carboxilo como los ácidos urónicos); en su mayoría resultan de los tratamientos para análisis.

Estructuralmente, el humus presentaría estructuras aromáticas y alquílicas condensadas resistentes a la biodegradación, y unos constituyentes periféricos o *dominios*, menos condensados, con carácter predominantemente alifático, incluyendo del orden de un 50% de ácidos grasos y alcanos —con más de 12 átomos de carbono (Mustin, 1987).

Considerando propiamente las fracciones húmicas de los suelos (Stevenson 1994), los AH son más ricos en nitrógeno (0.8 a 4.3 %), seguidos por los AF (0.9 a 3.3 %) y por la humina (1 % de N). Senesi et al. (1989) encuentran que los AH acuáticos tienden a ser más ricos en oxígeno, más pobres en carbono y en nitrógeno que los AH de suelos, y que los AF acuáticos son más ricos en C y N que los de los suelos.

En resumen, la humificación consiste en la formación de macromoléculas complejas, las cuales se integran como un continuo de compuestos orgánicos simples, derivados de la degradación, con otras macromoléculas del suelo (principalmente ligninas y taninos condensados) y mediante mecanismos en los que intervienen las arcillas como factor pasivo y los microorganismos como

agentes activos. Las sustancias húmicas no tienen una estructura regular u homogénea, pero presentan propiedades similares.

Actualmente se considera a las sustancias húmicas como la parte mayoritaria (70 a 80%) de la materia orgánica de los suelos minerales, formadas por componentes orgánicos en su mayoría hidrofílicos. Durante varios años se diferenciaban como AH aquellos solubles en álcali diluído (en agua) e insolubles en ácido (Piccolo 2002), y como AF aquellos solubles en medio ácido de $\text{pH} < 1$.

La visión respecto a las sustancias húmicas ha cambiado a partir de resultados de diferentes trabajos, que se pueden agrupar en tres, basándose en sus respectivos procedimientos de análisis (como lo planteaban Clapp y Hayes, 1999):

1. aquellos obtenidos al estudiar una colección de muestras de AH cuidadosamente fraccionados mediante la técnica de gel-permeación (“size-exclusion chromatography”) y ultracentrifugación, dando lugar a un modelo “aleatoriamente conformado” para las moléculas de AH (Swift 1999).
2. el segundo punto de vista considera a las sustancias húmicas como asociaciones de moléculas relativamente pequeñas unidas por fuerzas de interacción débiles (Clapp y Hayes 1999; Piccolo 2001)
3. la tercera propuesta considera a los AH como estructuras en solución.

Piccolo (2001) revisa el concepto de sustancias húmicas que les considera como polímeros, señalando que actualmente hay muchas evidencias experimentales, alternativas a los modelos y procedimientos analíticos aplicables a polímeros puros, que muestran que pueden existir asociaciones de moléculas (heterogéneas y relativamente pequeñas) que se ensamblan entre sí, derivadas de la degradación y descomposición de material biológico “muerto”: sustancias húmicas cuya conformación es supra-molecular, estabilizada predominantemente por fuerzas dispersantes débiles y no por uniones covalentes, y cuyo aparente

tamaño molecular grande se debe a fuerzas hidrofóbicas: van der Waals, uniones entre carbonos con orbitales π , y uniones hidrógeno que aumentan con el pH.

En 2008, Smejkalova y Piccolo utilizaron espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear por difusión ordenada (DOSY-NMR) aplicada a AF y AH de distintos orígenes, y al encontrar que el tamaño molecular fue más grande en los carbohidratos de la fracción AF, que presentaban los menores coeficientes de difusión entre todos los compuestos húmicos (indicando que se agregan en asociaciones de mayor tamaño), y que presentaron respuestas de agregación y desagregación (más frecuentes entre los AH que entre los AF), ausentes entre los polímeros usados como patrón, los autores consideran que todas estas propiedades apoyan la hipótesis de la naturaleza supramolecular de las propiedades de las sustancias húmicas. Incluso probaron la posible formación de micelas húmicas mediante los cambios en difusividad manifestada por los espectros DOSY y la variación en las señales de RMN para el ion hidrógeno, encontrando que en los AH de turbas y en los AH de suelos se manifiesta una reorganización en estructuras semejantes a micelas, lo cual no ocurrió con los polímeros (Piccolo 2001).

De tal modo, la reactividad de las sustancias húmicas estaría dada en gran medida por esa estructura molecular, sin relación directa con grupos químicos específicos en las moléculas (MacCarthy, 2001).

El composteo.

Se denomina **composteo** a un procedimiento que consiste en “hacer fermentar desechos orgánicos biodegradables (sobre todo sólidos y semisólidos) apilados y en presencia del oxígeno del aire, para obtener un abono rico en humus; esencialmente, producir humus estables (Mustin 1987) manejando la aireación y el contenido de agua de la pila para controlar la velocidad y el tipo de descomposición (Russell 1973), con el fin de transformar los constituyentes orgánicos de los subproductos y desechos hacia un producto orgánico estable e higiénico “rico en humus”, **la composta** o **el compost**, que posteriormente se

aplica al suelo, con el cual se logra revalorar los desechos procesados. (Thompson et al. 2002; Mustin 1987).

Los desechos orgánicos biodegradables, sobre todo sólidos, se someten al tratamiento aeróbico hasta que se estabilizan. Durante el proceso, el calor y otros factores internos de la pila eliminan a los gérmenes y parásitos dañinos (Mustin 1987); y se reciclan los residuos orgánicos de modo que se transforma en sustancias **similares a las húmicas** que darán estabilidad y fertilidad a los suelos.

En el composteo, un sustrato orgánico se homogeneiza mecánicamente y se inocula con bacterias, actinomicetos y hongos, los cuales degradan o alteran las biomacromoléculas presentes en el sustrato de partida; aumenta la temperatura y se produce una selección progresiva de las especies termófilas (dominando bacterias y actinomicetos). Una vez que se ha estabilizado el medio tiene lugar la humificación en sentido propio de los compuestos orgánicos por acción de hongos, bacterias, actinomicetos, y fauna, obteniéndose finalmente la **composta**. Depositada en el suelo la composta, el material orgánico interactúa con las arcillas para formar el complejo arcillo-húmico que incorpora progresivamente humus al suelo (Mustin 1987).

En agricultura, un abono o enmienda tradicional consiste en materiales de desecho, animal o vegetal, que se agregan al suelo en un momento adecuado para que mejore algunas propiedades biológicas, físicas y químicas, ya sea aportando nutrimentos, o bien incrementando el humus del suelo. Cuando un material vegetal que no se ha descompuesto capta poca agua y es grueso y fibroso; en cambio la composta obtenida del mismo en tiempo corto contiene mucha agua y es muy friable. Si se permite su descomposición en el suelo, como enmienda, reporta mejores rendimientos que el material compostado antes de agregarlo.

Durante el proceso de composteo en pila pueden tener lugar pérdidas de nitrógeno y potasio, que se reducen agregando un poco de arcilla que adsorbe el amonio, y evitando su pérdida por volatilización o por lixiviación en formas

solubles desde la pila. A través de la elevación de la temperatura al máximo en la pila se eliminan fitoparásitos y semillas de plantas no deseadas, antes de aportar los residuos de nuevo en el suelo.

Actualmente se desarrolla el composteo para: aplicar los productos (composta) en agricultura o en horticultura; producir substratos selectivos en el cultivo de hongos; tratar desechos orgánicos (Miller 1993); y además se utiliza en la producción de lombrices (Martínez 1999).

a) Descomposición de la materia orgánica.

Al diseñar y desarrollar el composteo, es muy útil conocer cómo tiene lugar la degradación de la materia orgánica en el suelo. Los procesos implicados pueden ser semejantes en suelos de distintos ecosistemas, pero la dinámica difiere debido a la calidad del material en descomposición (Smith et al. 1992).

Donde los residuos orgánicos presentan compuestos poco accesibles para los microorganismos, la degradabilidad metabólica rige la tasa y la extensión de su descomposición (de mayor a menor, carbono soluble > proteína > celulosa > lignina). Se combinan la descomposición, la condensación y la humificación, y conforme avanzan las dos últimas, el complejo resultante se vuelve resistente al ataque microbiano.

La materia orgánica del suelo que deriva de material vegetal está constituida por 10 a 20 % de carbohidratos, 20% de compuestos nitrogenados, 10 a 20 % de ácidos grasos, y el 40 a 60% restante son compuestos aromáticos complejos. Las tasas de reciclado están relacionadas con el tamaño del residuo y con la asociación de éste con la arcilla (25 años para los materiales mayores a 250 µm, 50 años para los menores a 20 µm asociados a arcilla, de acuerdo con Smith et al. 1992).

La degradación también está condicionada por los elementos o nutrientes, y el elemento que excede en el sistema los requerimientos celulares microbianos se libera hacia el sistema como componente inorgánico (Smith et al. 1992).

b) Mineralización

Los ciclos biogeoquímicos de los elementos biogénicos están controlados por la calidad de los compuestos de carbono, o calidad del sustrato, y cuando esos compuestos de carbono se mineralizan a CO_2 otros elementos son liberados como iones inorgánicos, lo que representa la llamada mineralización neta (produciendo un excedente de nutrientes) sólo si los organismos no toman los iones inorgánicos para la síntesis celular (Smith et al. 1992). El proceso de mineralización-inmovilización tiene lugar de la misma manera con el N, el P y el S, y determina la cantidad de nutrientes potencialmente disponibles para las plantas.

Pero el punto que determina que exista mineralización neta o inmovilización neta es distinto para cada nutriente, y puede variar entre ecosistemas o entre distintas comunidades de plantas. Como una primera aproximación, si la relación C/N es menor que 25 o la relación C/P o la relación C/S es menor que 60, predominará la mineralización neta de los elementos. Si la relación es mayor que estos valores predominará la inmovilización (Smith et al. 1993).

c) Microorganismos

Los microorganismos que intervienen en la descomposición dependen del material que se descompone, y del suelo (Mustin 1987): bajo condiciones aeróbicas húmedas y cálidas dominarían inicialmente los hongos, y luego las poblaciones dominantes cuando el suelo fuese ácido serían de hongos degradadores de la celulosa, y si el suelo fuese neutro iniciarían la descomposición hongos degradadores de azúcares y celulosa a los cuales seguirían en sucesión las bacterias. Si el material vegetal contuviese tejidos fuertemente lignificados continuarían dominando los hongos; y en suelos poco aireados dominarían las bacterias desde el principio, acumulándose los tejidos lignificados como turba o como fibra. Productos del metabolismo bacteriano son las gomas de poliurónidos de la pared celular, otros polisacáridos, y sustancias “semejantes al humus”; en cambio, son productos del metabolismo fúngico sustancias de color oscuro –melaninas fúngicas– también semejantes al humus (Tan 2003).

La biomasa microbiana es el compartimiento o reserva de nutrientes (y carbono) lábil, cuyo reciclado determinará la disponibilidad de N, P y S (Smith y Paul 1993). Las tasas de retorno de la biomasa microbiana varían con el manejo y las prácticas de cultivo: calculadas entre 15 días y hasta 27 años, cuando se asume sólo la biomasa microbiana activa (10 a 40 por ciento de la biomasa microbiana total), el tiempo de reciclaje de la biomasa en muchos sistemas está entre 4 meses y 1 año.

d) Fauna del suelo

La fauna del suelo influye de múltiples maneras: sobre la estructura del suelo mediante sus galerías y mediante el transporte continuo de materiales; homogeneiza finamente las partículas minerales (sobre todo arcillas) y las moléculas orgánicas dentro de sus tractos digestivos; facilita la colonización del material por hongos, bacterias y protozoarios, en un proceso directo de degradación o paralelo a la humificación. La fauna incorpora al suelo de un 20 a un 40 por ciento de la hojarasca o materia orgánica sin descomponer que llega anualmente a la superficie, tanto en forma de material finamente fragmentado, como de excretas animales (Theng et al. 1989).

La biomasa vegetal muerta puede pasar por el tubo digestivo de los animales del suelo, incluso varias veces, antes de ser completamente degradada; en particular, las lombrices consumen la materia orgánica sin descomponer hasta 2 a 3 veces más rápido que los otros grupos (Mustin 1989). Algunas especies de lombrices enriquecen el suelo con los ácidos húmicos de sus excretas favoreciendo el desarrollo de tomate y pepino (Atiyeh et al. 2002) y el desarrollo de las raíces del maíz (Canellas et al. 2002); otras facilitan la mineralización, como *Pontoscolex corethrurus* (Desjardins et al. 2004); otras más, como *Aporrectodea caliginosa*, favorecen la formación de macro-agregados y la asimilación de nitrógeno en trigales (Fraser et al. 2004).

El proceso de composteo: parámetros.- La descomposición de los materiales orgánicos durante el composteo sigue, como en el suelo, transformaciones en secuencias definidas (Mustin 1987). En el proceso intervienen principalmente

microorganismos que fermentan y/o mineralizan los desechos orgánicos. Los principales parámetros que se deben medir y controlar durante el proceso influyen sobre las condiciones de vida de los microorganismos:

- La aireación, el oxígeno en el aire dentro del material compostado;
- la humedad del material;
- la temperatura que alcanza;
- las características físicas y químicas del material compostado.

La **aireación** consiste en aportar oxígeno a la composta para que las bacterias y hongos puedan degradar aeróbicamente la materia orgánica, evitando que llegue por abajo del 5% (el límite de anaerobiosis es el 2%). El espacio necesario para la circulación del aire entre partículas (y para la película de humedad que les rodea) está determinado por la **porosidad** de la pila (Thomson *et al.* 2002), y la proporción de oxígeno presente en el aire de esos poros o “lagunas” se denomina “tasa de oxígeno lagunar”. El oxígeno se desplaza dentro de la masa compostada bajo el efecto de muchos gradientes —el de presión de los gases entre la composta y el aire, el de solubilización del oxígeno, y el de su difusión, de acuerdo con Thomson *et al.* 2002— hasta que los microorganismos lo consumen. Sin embargo, los volúmenes que entran pueden calcularse mediante la fórmula de la ley de Boyle-Mariotte, una vez determinadas la temperatura y la presión. El consumo de oxígeno se expresa en miligramos (o milimolas) por hora por gramo de materia seca, en condiciones de temperatura y presión normales (20 °C, 1 atmósfera). En las primeras fases es óptimo un espacio lagunar de 30 a 36%.

La velocidad a la cual el oxígeno pasa del espacio lagunar a los microorganismos, o aireación, determina la velocidad del composteo, y depende de la superficie expuesta de la pila, y de las cantidades de oxígeno que, tanto en la película de agua como en el aire, rodean a las partículas. El consumo de oxígeno es un indicador directo de la actividad de los microorganismos aerobios, y es un parámetro confiable para definir la velocidad de evolución de una composta.

La **humedad** en la pila se mide y se controla para asegurar que el agua sustente la actividad microbiana (Thomson et al. 2002, Mustin 1987). Aumenta un poco con el agua metabólica producida por la respiración, pero en cambio disminuye debido a la pérdida como vapor al aumentar la temperatura, al aumentar la aireación, o cuando el material es más fino (la superficie expuesta al aire es mayor). Una pila bien aislada pierde poca agua, que se compensa con el agua metabólica. Cuando la proporción de agua está cerca del 40 a 50 % del peso total de la masa se considera que existe inhibición de la actividad microbiana; si la humedad relativa en la pila está hacia 61%, el medio se considera seco (Haug 1980). La masa compostada se riega entonces para reiniciar la actividad bacteriana, que es seguida por nueva elevación de la temperatura.

Al determinar la **temperatura de la pila** se mide la generación de calor debida a la actividad catabólica (fermentaciones aeróbicas o alcohólicas) de las bacterias termofílicas (Thomson et al. 2002). Varía durante el composteo en función de la composición de los substratos y de la naturaleza de los cambios térmicos. Los desechos ricos en lípidos liberan más calor por unidad de masa que otros compuestos orgánicos: en promedio, la oxidación completa de un gramo de lípido libera 9.4 kcal, de un gramo de proteínas se obtienen 5.6 kcal y de un gramo de glúcidos se obtienen 4.5 kcal.

El calor emitido por la masa que fermenta está determinado por la rapidez con que se degrada el sustrato, lo cual depende de la cantidad de sustrato, de la forma de las pilas (o la del reactor), del clima, de la presencia de capas externas aislantes, etcétera. En una fase inicial se consumen los compuestos fácilmente degradables, y participan microorganismos termófilos cuya temperatura óptima está entre 50 y 60 °C; la temperatura asciende a más de 55 °C suprimiendo a la mayoría de los patógenos y a las semillas de plantas resistentes. En la descomposición posterior participan microorganismos termófilos, y mesófilos cuya temperatura óptima está entre 30 y 45 °C. Más tarde, los microorganismos mesófilos inician la descomposición lenta de fuentes de energía menos accesibles (hemicelulosas, celulosa, lignocelulosa y lignina) en la llamada fase de curado

(Thomson *et al.*, 2002). El tiempo de retención bajo los distintos regímenes de temperatura garantiza la estabilización completa de los substratos, y la degradación total de fitotoxinas orgánicas generadas durante las primeras fases de composteo y curado.

Las temperaturas se estabilizan cuando la producción de calor compensa la pérdida del mismo. Las pérdidas de calor durante el composteo se deben primero a la radiación, en segundo lugar a la conducción, y por último a la convección; éstas últimas aumentan en los sistemas con aireación forzada. Cuando la masa de composta está más caliente que el ambiente, emite energía radiante o **radiación** principalmente como radiación infrarroja o calor. La **conducción** se define como la transferencia de calor entre dos puntos de la masa a compostar, e influyen en ésta el calor específico del material y la conductividad térmica de la masa. La **convección** es el movimiento de fluido entre una zona caliente (donde una masa gaseosa capta calor) y una zona fría (donde la masa gaseosa cede calor); durante el composteo aireado el aire exterior difunde o es impulsado dentro de la pila, y el aire interior caliente y húmedo sale a zonas externas más frías cediendo calor al enfriarse y condensarse.

En resumen, la temperatura de una composta proviene de la energía liberada como calor por los microorganismos aeróbicos dominantes al inicio, y no rebasa el punto de equilibrio térmico dinámico obtenido entre la producción de calor y las pérdidas del mismo; destruye a la mayoría de los gérmenes patógenos, evapora el agua, acelera la hidrólisis de los compuestos orgánicos, y activa la humificación. Junto con la humedad, son los parámetros más importantes a controlar durante el composteo.

La relación entre los parámetros del composteo se representa con la ecuación de Fick:

$$dM / dt = -S \times D \times (dO / dl)$$

que incluye: la cantidad de oxígeno (**M**) en el aire vecino a la pila, el tiempo transcurrido [**dt**], el área en la pila expuesta al aire (**S**), el coeficiente de difusión del oxígeno (**D**), y el oxígeno disuelto según la distancia a la superficie de la pila

[**dO / dl**]. Se considera que el gradiente va desde la saturación en la interfase gas-líquido (condiciones aerobias) hasta cero en el centro de la partícula orgánica (donde el oxígeno se ha consumido). El coeficiente D varía según la temperatura y la naturaleza del líquido, y para una capa biológica se considera un valor 80 a 90% el del agua pura.

En cuanto a los **nutrimentos** para los microorganismos, la única fuente es el sustrato. Por lo común el factor limitante es un macro-nutriente, y los oligoelementos se encuentran en cantidad suficiente. Los **factores mayores** son los macro nutrientes (N, P, K, S), el pH y el agua (o humedad). Las cualidades y cantidades de sustrato se pueden definir para cada cepa de microorganismo; el equilibrio (dinámico) se establece ajustándose a los factores limitantes.

La proporción carbono/nitrógeno es un indicador útil: antes del composteo, señala si el nitrógeno limitará la degradación. Durante el composteo, la dinámica de la descomposición hace cambiar las proporciones ya que los sustratos orgánicos pierden más rápido el carbono que el nitrógeno, e indica cuánto ha avanzado la degradación. Y al final del composteo esa proporción define si la composta puede ser fuente de nitrógeno para las plantas en el suelo en el cual se aplica, o serán los microorganismos del suelo los beneficiarios que determinarán el destino de ese nutriente. Así, la proporción C/N es un índice en cada momento del proceso, y su seguimiento es muy útil. Una proporción C/N en el sustrato adecuada para iniciar el composteo está entre 30 y 35 (Haug 1980), y el tiempo necesario para el composteo tiende a ser mayor conforme mayor sea esa proporción.

Composteo, procedimientos.

El composteo implica varios procedimientos, que pueden resumirse en los siguientes (Mustin 1987, Thomson et al. 2002):

- Recolección de los desechos;
- Preparación de los sustratos: selección, molienda, homogeneización;
- Fermentación;

- Acabado de la composta: maduración, curado, tamizado y refinado, almacenamiento, acondicionado, y ejercicio de los controles previos a su distribución.

El tamaño de partículas puede estar entre 0.5 y 1 mm (basuras urbanas), 0.1 a 1 mm, o hasta 5 mm si la forma de las partículas (laminar, hojuelas) favorece los espacios lagunares en la pila y el material está seco.

El material debe **homogeneizarse** antes de la fermentación.

La **fermentación** puede seguir uno de dos sistemas: el “lento”, con baja temperatura, en cama delgada de sustrato (composteo de superficie, y vermicomposteo), con fase termófila durante algunas semanas y maduración de algunos meses, con lo cual las fases termófilas se reducen a pocos días, y también las mesófilas; o el “acelerado”, con temperaturas medias y altas (sobre 40 a 45 °C), sea abierto (en contacto con el aire) o cerrado (fermentadores aeróbicos).

La temperatura se controla en la práctica al formar masas de sustrato con buenas condiciones de oxigenación y de aislamiento: cubriendo la pila con los productos vegetales secos, con plásticos, o con una capa delgada exterior (de composta madura, tierra ligera o arena) y una gruesa en contacto con el producto a compostar (de material vegetal seco y picado).

Cuando la aireación es pasiva o natural sólo la porosidad de la pila asegura su oxigenación, determinada –como se ha visto– por la relación superficie exterior de la pila / volumen total, la densidad media del producto, la porosidad y el espacio lagunar, la tasa de humedad, y la naturaleza del sustrato. Substratos muy húmedos, muy finamente divididos, o pegajosos, o grasos, requieren calcular los **parámetros de composteo**, y desarrollar experimentos en los cuales se controlen los parámetros mayores.

La aireación forzada se utiliza cuando los sustratos son fermentables (desechos vegetales o animales, agrícolas o de alimentos, lodos de depuración), pues los espacios lagunares tienden a saturarse: se puede agregar un agente estructurante, utilizar capas de poca altura con ventilación forzada, o usar un

fermentador aeróbico con aireación continua. Se puede también voltear la masa en composteo (en cuyo caso la oxigenación es discontinua). Los factores limitantes son: el contenido en oxígeno, que cae a cero en pocas horas; y los incrementos de temperatura que a veces no son suficientes para rebasar los 50 ó 55 °C. Así, son los parámetros fundamentales de esta técnica: la frecuencia con que se voltea el material, y la humedad y la porosidad que la masa conserva. En cada vuelta se considera una media de 50% de la masa que se somete a condición aeróbica, y se usa la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 - Frecuencia recomendada para voltear una pila.

HUMEDAD (%)	Frecuencia de vueltas
superior a 70%	Diaria o 2 veces al día
60 a 70 %	Cada 2° día, mínimo 5 vueltas
40 a 60 %	Cada 3° día, 4 vueltas
inferior a 40%	Demasiado seco: aportar agua y proceder como se indica arriba.

Las necesidades de oxígeno en el proceso de composteo se pueden estimar utilizando las fórmulas de oxidación de la materia orgánica presente, y a partir de la velocidad de degradación biológica de los productos orgánicos considerados durante la fermentación aireada. Se emplean fórmulas de composición media de los compuestos iniciales:

azúcares simples $C_6H_{12}O_6$	proteínas $C_{16}H_{24}O_5N_4$	polisacáridos $(C_6H_{10}O_5)_n$
madera $C_{295}H_{420}O_{186}N$	grasas y aceites $C_{50}H_{90}O_6$	gramíneas $C_{23}H_{38}O_{17}N$
biomasa de bacterias $C_5H_7O_2N$	biomasa de hongos $C_{10}H_{17}O_6N$	

Los consumos de oxígeno varían entre 1 y 4 gramos de oxígeno por gramo de materia orgánica (Mustin 1987); el consumo para celulosa está cercano a 1 g $O_2 \cdot g^{-1}$, y en cambio el metano (hidrocarburo saturado) consume 4 g $O_2 \cdot g^{-1}$. Es

necesario contar con una estimación de la biodegradabilidad, como se presenta en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 - Biodegradabilidad de algunos componentes de la cascarilla del cacao*.

COMPONENTE	Composición, % de materia seca	Biodegradabilidad, %
Celulosa	28.15 ^a (de 40 a 15)	70 ^c (entre 90 y 50)
Xilano ^a	4.94 ^a	
Acetil	1.43 ^a	
Pectina	5.9 ^a	99 ^e
Ácido péctico	4.5 ^a	
Grasa (ácidos grasos: palmítico 12.932%, esteárico 18.762%, oleico 20.193%, linoleico 1.113%)	53 ^a	50 ^c
Teobromina	1.71 ^a 1.06 ^d	
(Desechos de plantas en jardines)		66 ^c

* datos retomados de: a) Minifie 1989, b) Mustin 1987, c) Haug 1980, d) Bonvehi y Jordà 1998, e) Field 2009

Maduración.- La composta se considera madura, en términos generales, cuando han tenido lugar uno o varios de los siguientes hechos:

- Disminuye progresivamente la temperatura al final del composteo en pila;
- La elevación espontánea de la temperatura en el producto final es muy leve, o no hay elevación de la temperatura cuando se aplica humedad 50% y se airea volcando (Mustin 1987)
- El contenido orgánico de la composta ha llegado a un nivel determinado, medido como contenido en SV (sólidos volátiles), como porcentaje de carbono, o contenido de cenizas, o proporción C/N cercana a 21 (Thompson 2001).

- La demanda química de oxígeno (DQO) o tasa de consumo de oxígeno es baja o nula;
- La composta presenta constituyentes particulares tales como nitrato, y están ausentes otros tales como amoníaco y almidón;
- El producto final no atrae insectos ni desarrolla larvas;
- Hay cambios característicos en el olor durante el composteo, y muy poca producción de olores al rehumedecer el producto final, y
- Aumenta el potencial redox.

Para definir la maduración se consideran cuatro métodos generales (Mustin 1987): empíricos, respirométricos, químicos, o pruebas biológicas. Los empíricos se refieren al origen y la edad del producto, a que su color es muy oscuro, su olor no es desagradable, es friable al tacto, y no se pueden reconocer a simple vista los materiales de origen; al humedecer de nuevo hasta 50% de humedad una pequeña parte del material tratado mezclándolo muy bien, no existirá nueva elevación de la temperatura, demostrando así la estabilidad de la composta.

Los métodos respirométricos parten del principio de que cuando la fermentación dentro de la composta ha terminado, la actividad microbiana —ya muy reducida— consume poco oxígeno y produce poco CO₂. Se puede usar un respirómetro comercial o un recipiente hermético adaptado (olla de presión) dentro del cual se pondrá una cantidad de composta cuyo peso se conoce y con una humedad igual al 80% de la capacidad de retención total (a 20 °C), la cual durante 3 horas consumirá una cantidad dada de oxígeno produciendo un cambio de presión ΔP si se capta el CO₂ en una solución de NaOH.

Los experimentos indican que en poco más de seis meses las compostas maduras se han estabilizado bastante. Se considera madura una composta si su “respiración” es inferior a 40 mg de O₂ consumidos por kg de materia seca de composta por hora, o 7 mg de O₂ consumidos por gramo de composta seca en 7 horas. Se debe completar esta prueba con una prueba biológica, para asegurarse de la ausencia de fitotoxicidad en la composta.

Los métodos físico-químicos consisten en:

- Medir el pH o potencial de óxido-reducción de la composta;
- Medir la proporción de iones sulfuro;
- Medir la fracción fácilmente biodegradable y la fracción resistente a la biodegradación de la materia orgánica (la primera se mide a través de la reducción de dicromato que ataca a la materia orgánica en frío en presencia de ácido sulfúrico concentrado, y la segunda mediante la resta de esa fracción a la de carbono total a 950 ó 1000 °C);
- Determinar la demanda química de oxígeno atacando la materia orgánica en ebullición con dicromato de potasio en medio sulfúrico y en presencia de sales de plata (Clesceri et al. 1992); se juzga adecuada la madurez cuando la DQO es inferior a 350 mg/g de composta.
- Medir la proporción C/N; una composta madura presentará una relación C/N menor a 21 (Thomson et al. 2002);
- Medir la cantidad de nitrógeno amoniacal y la de nitrógeno de nitratos (en la composta madura todo el nitrógeno mineral se encuentra en forma de nitratos), bien en laboratorio o con métodos colorimétricos en campo;
- Prueba de cromatografía circular en papel: se evalúan los aminoácidos de un extracto de la composta con agua en papel filtro, revelados con butanol, ácido acético y solución de ninhidrina (Masayuki, 1999).
- Probar la presencia de almidón en un extracto ácido del material compostado, con yoduro de potasio (Lossin, 1970, Díaz et al. 2005); la composta está madura cuando no se presenta color (azul o violeta) al formarse un complejo coloreado en el extracto. Esta prueba parte de que el sustrato (desechos vegetales) contiene almidón, el cual se degrada y metaboliza antes de que la composta se pueda considerar madura.

El *porcentaje de oxígeno en la pila* indica el intercambio de CO₂ y otros gases generados por la actividad metabólica microbiana, en tanto que una

aportación adecuada de oxígeno y la consecuente actividad aeróbica minimizan la generación de olores (Thomson et al. 2002).

Los métodos biológicos consisten en probar la respuesta de organismos (indicadores biológicos, que integran gran número de otros parámetros) a la proporción o porcentaje de maduración de una composta dada. Las compostas inmaduras contienen sustancias que inhiben la germinación y el crecimiento de microorganismos, de plantas o de animales del suelo. Así, se realizan pruebas del porcentaje de germinación y de desarrollo de plantas: utilizando berros sobre mezcla de composta de 5 meses y turba o arena humedecidas, 80% de germinación significa que “no hay inhibición”; o se cultivan plántulas de maíz y haba durante 28 días (en una cuba con composta pura o mezclada con turba clara, cuyo pH se ha corregido por encalado) que enrojecen si hay fitotoxicidad. Se evalúa la madurez de la composta determinando la actividad microbiana (metabolismo) en ella, o cuantificando el ATP (una vez rebasada la fase termófila el ATP decrece con el tiempo); o mediante el desarrollo del hongo *Chaetomium gracile* en medio de cultivo con agar-agar, la composta a probar y nutrientes, se inocula y se incuba durante 12 días a 37 °C; si la composta no está madura presenta abundante micelio aéreo con 5000 fructificaciones, o en la composta madura sólo 300 fructificaciones.

También se puede caracterizar a la composta mediante análisis termogravimétrico (Blanco y Almendros, 1994), que se basa en seguir la pérdida de peso en el material de la composta destruido entre los 360 y los 540 °C, (que también refleja indirectamente las proporciones H/C, O/C, C/N y el contenido de lignina); probada con compostas de paja de trigo —una vez eliminado el hidrosoluble—, mostró una correlación muy significativa con la germinación y el rendimiento de cultivos tratados con aquellas.

Tiempo.- El tiempo que ha de someterse a composteo un material para llegar a considerarle maduro depende de varios factores. Para definir el tiempo al cual deben someterse a composteo en suelos los desechos de drenaje municipal, Parr y Hornick (1993) marcan como factores importantes la disponibilidad de

nutrientes, la estabilidad de los compuestos orgánicos a degradar (que aumenta con el composteo), el método con el cual se aplica el desecho al suelo (superficial, inyectado, incorporado), la época en que se aplica (factores estacionales y climáticos), y en su caso también las propiedades químicas, físicas y microbiológicas del suelo al cual se aplican los desechos. Los tiempos de retención de “desechos sólidos mezclados” se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 - Tiempo de retención en distintos procesos de composteo.

Tipo de proceso o nombre	Tiempo de retención	Vuelco, frecuencia
Indore	120 a 128 días ⁽¹⁾	Días 15, 30, 60 ^(6, 7)
Indore	120 días ⁽²⁾	
Indore	112 días lodos aguas negras ⁽³⁾	
Van Maanen	120 a 128 días ⁽¹⁾	Una vez
Brikollari o Caspari	40 días ⁽¹⁾	
Earp-Thomas	2 a 3 días mas 3 meses ⁽⁴⁾	Cada 3 de 24 horas
producción de Champiñones	104 días ⁽⁵⁾	

(1) Haug 1983. (2) Parr y Hornick 1993. (3) Subba *et al.* 1993. (4) FOMSA 1960. (5) Mustin 1987.

(6) Solomon 2010. (7).

Thomson y colaboradores (2002) señalan que al planear el composteo han de incluirse: previamente, la colecta y el transporte de los materiales a la instalación; 1 la recuperación del substrato y 2 su preparación; 3 el Composteo y su fase termofílica; 4 el tratamiento de olores; 5 el Curado de la composta; 6 el Tamizado y la refinación de la composta; 7 el almacenamiento (o empacado) de la composta; y el **Producto terminado** como resultado final del proceso.

Los parámetros más importantes al inicio son las proporciones carbono/nitrógeno y carbono/fósforo, la estructura y porosidad, la proporción de oxígeno, el porcentaje de humedad, y la temperatura (Thomson *et al.* 2002). Se manejan: la distribución de las partículas o agregados, los aditivos y enmiendas, la activación biológica y la diversidad microbiana, el volteo o vuelco y la mezcla, la aireación, el pH, y la reducción de patógenos y malezas. Debe asegurarse el tiempo más corto posible para obtener un producto de calidad constante o

consistente. Otro factor importante es el *balance de nutrientes* en la pila: la proporción C/N y la proporción C/P necesarias para una actividad microbiana vigorosa y para una degradación o estabilización completas. Durante cada fase deben controlarse los compuestos tóxicos y los organismos patógenos (sanidad) mediante pruebas de crecimiento (*growth screening*), y los inertes agregados durante el proceso; la estabilidad biológica, el contenido de materia orgánica, el pH, el contenido de sales solubles, la capacidad de retención de agua, la densidad aparente o bruta ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ base peso seco en horno a 70 °C), el tamaño de partícula (referido como el tamaño de malla que puede atravesar), el contenido de humedad, y el contenido de nutrientes para las plantas. Los métodos de prueba están descritos en diversas publicaciones: Horowitz 1990; Clesceri *et al.* 1992; NCR-221 1988; Thomson *et al.* 2002; US EPA Report SW-846 1990.

Se retoman aquí sólo aquellos que son aplicables al composteo de la cascarilla de cacao en particular, que constituye un sustrato ya seleccionado y sin otros materiales por descartar.

Vermicomposteo: posibilidades de uso.

El vermicomposteo es un procedimiento en el cual se utilizan lombrices para que consuman desechos orgánicos, produciendo en grandes cantidades su estiércol y más lombrices. Su estiércol resulta un producto con olor a tierra, que contiene nutrientes de manera estable pero disponibles para las plantas, es biológicamente activo y puede contener sustancias que actúan como hormonas vegetales (Dickerson 2004); cuando es el producto final de la desintegración de material orgánico por lombrices se le denomina vermicomposta. Se requiere que el sustrato utilizado no dañe a las lombrices, que les aporte nutrimentos y hábitat permitiéndoles crecer sanas, y reproducirse. A cambio, las lombrices enriquecen el sustrato con materia orgánica, compuestos ricos en nutrientes y compuestos orgánicos con funciones benéficas para los suelos y las plantas. (Compagnoni y Putzolu 1995, García 1999).

Los productos de la actividad de las lombrices mejoran las propiedades físicas del suelo, aumentando su tasa de infiltración de agua, así como la

asimilabilidad de los nutrimentos, estimulando la actividad de los microorganismos y modificando la composición de las comunidades de éstos; favorecen también la mineralización de los compuestos orgánicos, por un lado, o la formación de compuestos orgánicos más complejos y estables a partir de los materiales que ingieren, por otro (García 1999; Edwards et al. 1995).

El ciclo general de las lombrices incluye las fases siguientes: capullo o huevo, incubación, nacimiento, estado inmaduro, desarrollo, estadio adulto cuando aparece el clitelo, y postura. La duración de cada fase varía según la especie: la incubación, 3 semanas en unas especies hasta 8 meses en otras (Edwards y Bohlen 1996); el desarrollo abarca de 17 a 52 semanas en condiciones naturales, en especies distintas a *Eisenia foetida* (Edwards y Bohlen 1996). La edad madura, marcada por la aparición del clitelo, ocurre a los tres meses en *E. foetida*; y la postura ocurre a las 20 semanas (Compagnoni y Putzolu 1955).

Los adultos de distintas especies pueden vivir desde cuatro hasta diez años en condiciones protegidas (Edwards y Bohlen 1996). Bajo vermicomposteo viven 4 años según Ferruzzi (1994) o unos 16 años según Compagnoni y Putzolu (1995). La tasa de reproducción es variable: un adulto produce de 1000 a 1500 crías al año (Mustin 1987, Ferruzzi 1994); cada capullo contiene entre 4 y 20 huevos fecundados, pero sólo se desarrollan de 2 a 10 juveniles por capullo incubado. Pueden alcanzar una densidad de 10,000 a 40,000 individuos por metro cuadrado. Un peso de 10 kg de biomasa de lombrices consumen 1 a 2.75 kg de materia seca al día, transformándola en vermicomposta (Ferruzzi, 1994).

Para elaborar vermicomposta se emplean por lo común lombrices epigeas, detritófagas que viven en los sustratos orgánicos en descomposición (Makeschin 1997). Están expuestas a los predadores y son sensibles a microvibraciones en el suelo (Edwards y Lofty 1977). Presentan elevadas tasas de reproducción (mayores entre 15 y 30° C) y en condiciones de poca humedad producen formas de resistencia (Makeschin 1997). Para criarlas se requieren desechos orgánicos sin compuestos tóxicos, que contengan al menos 1% de calcio, humedad entre

50 y 60 %, buena aireación (oxígeno en proporción mayor a 15%, CO₂ en proporción menor a 6%), que la elevación de la temperatura durante el composteo sea ligera (máximas de 35 a 40° C), que el pH esté cercano al neutro, y que la materia orgánica esté presente en cantidad y calidad convenientes (Mustin 1987).

Las lombrices útiles para composteo no son sólo las consumidoras de hojarasca o epigeas. Se han reportado como composteras (Ferruzzi 1994) a tres especies geófagas, *Aporrectodea trapezoides*, *Diplocardia floridana* y *D. mississippiensis*, las cuales muestran efecto sinérgico asociadas con las epigeas (Edwards et al. 1995). Las lombrices anécicas se alimentan primariamente del litter que introducen a sus galerías (Blair et al. 1995), y sus turrículos consisten en mezclas de suelo, heces y hojarasca superficial fragmentada; por ello Makeschin (1997) les llama especies "transicionales epiendógeas", que también pueden convertirse en fabricantes de humus a partir de desechos vegetales. Se ha ensayado el uso de *Balanteodrilus pearsei*, *Diploctrema papillata*, *Protozapotecia australis*, *Zapatadrilus* sp., y las exóticas *Pontoscolex corethrurus* y *Pontoscolex elongata*, en vermicomposteo (Fragoso 2001). En particular, *P. corethrurus* ha mostrado una función epigea/anécica en campos cañeros de Australia (Lee, 1995). Algunas lombrices como *Eisenia andrei* prosperan a partir de los hongos que se encuentran frecuentemente en las compostas *Aspergillus flavus* (Pizl y Novakova 2004), y estos hongos también abundan en la hojarasca (Swift et al. 1979, Herrera y Ulloa 1990).

Al considerar el uso de las lombrices para vermicomposteo en el trópico, resultan importantes varios aspectos de su fisiología (descritos por Oglesby 1978). Las lombrices de tierra son hiperosmóticas respecto al medio cuando se les conserva sumergidas en agua, pero la inundación prolongada de un suelo resulta en la muerte de numerosas lombrices. Los metanefridios de las lombrices terrestres secretan orina hipo-osmótica (y más baja en sales) respecto a los fluidos corporales. A través de la orina se pierden de 2.4 a 2.5 % del agua por día (60% del peso corporal es agua), pero las del género *Lumbricus* situadas en solución salina producen un volumen mucho menor de orina, y cuando se mantienen en alta concentración salina cesa la excreción de amoniaco: existe un

control adaptativo sobre la función nefridial. En el balance de sales y agua es importante la función de los nefridios y del intestino: los excrementos de la endonéfrica *Pheretima* tienen un contenido de agua mucho más bajo que los de las lombrices exonéfricas en las mismas condiciones de humedad de suelo. Por otra parte, bajo inundación *Lumbricus terrestris* absorbe cantidades mínimas de agua, $4 \mu\text{L} \cdot 10 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$, mientras vacía como fluido por el ano $22 \mu\text{L} \cdot 10 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$. La condición hiperosmótica de los fluidos del cuerpo se mantiene a través de las sales inorgánicas en aquellos, del transporte activo de sales del medio, y del cambio en forma adaptativa (control *neurosecretorio*) de la permeabilidad del cuerpo al agua, después de cierto tiempo de adaptación de las lombrices.

Edwards y Bohlen (1996) señalan que el agua constituye de 75 a 90 % del peso corporal de las lombrices, y los requerimientos de humedad varían según la especie. Pueden sobrevivir a condiciones desfavorables de sequía ya sea moviéndose a un área con mayor humedad o entrando en diapausa, y parecen responder al potencial matricial del suelo. En condiciones de extrema sequedad pueden sobrevivir a pérdidas hasta de 75% (*Aporrectodea chlorotica*) o 70% (*Lumbricus terrestris*) del agua de su organismo, y la mayoría de los lumbrícidos toleran una pérdida del 50%.

Las preferencias de humedad en el suelo (Edwards y Bohlen 1996) son, para *H. africanus* 12.5 a 17.2 %, para *Allolobophora caliginosa* 20 a 45 % y para *Metaphire californica* 35 a 55% en suelo arcilloso. Las lombrices composteras tienden a preferir condiciones más húmedas, como *Perionyx excavatus* en estiércol vacuno con humedad de 80% a 25 °C, y de 80 a 85 % en otros materiales.

Como respuesta a la sequía las diferentes especies se han adaptado de distintas maneras: *Lumbricus terrestris*, *Aporrectodea longa*, *Eisenia foetida* y *Perionyx hupeiensis* se mueven hacia partes más profundas del suelo cuando la superficie se seca. *Allolobophora caliginosa* no emigra y sobrevive a condiciones de sequía, y los individuos que normalmente se encuentran en superficie penetran hasta 20 cm hacia abajo para entrar en diapausa. *Lumbricus rubellus* sobrevive durante la

sequía principalmente formando capullos. *Allolobophora caliginosa* aumenta la producción de excretas en un 20% al aumentar la temperatura de 10 a 15 °C cuando la humedad es de 48%, pero aumenta 100% con el mismo aumento en la temperatura si la humedad es de 60%. Edwards y Bohlen (1996) afirman que temperatura y humedad actúan en forma sinérgica sobre la actividad de las lombrices, lo cual resulta de gran importancia en el ambiente tropical.

La evolución de la materia orgánica es ligeramente más rápida durante el vermicomposteo que durante el composteo sin lombrices (Mustin, 1987). Las lombrices ingieren de 20 a 100 % de su peso vivo al día, y estimulan a la microflora aerobia; la proporción de oxígeno consumido es también mayor en 1.5 a 5 veces. Los productos reflejan fielmente la composición de los desechos orgánicos iniciales: pueden dar lugar a pérdidas de nitrógeno menores y a una mejor agregación de la materia orgánica, por los mucopolisacáridos de las lombrices y el micelio de los hongos que les acompañan. No son superiores en enzimas activas, pero aparentemente es más rápida la formación de ácidos húmicos y es mayor la humificación de un sustrato dado.

Las lombrices contribuyen con su actividad a la mejora de los suelos en los que son nativas, o en aquellos en los cuales se han adaptado tras muchos años de cultivo. Los lumbrícidos secretan celulasa, y las especies anécicas están particularmente asociadas con la descomposición de la hojarasca (Michel y Devillez 1978), y con la formación y redistribución de la materia orgánica del suelo (Anderson y Flanagan 1989). Es limitante para sus poblaciones que haya un período seco durante el año (de 4 a 5 meses o más corto), una precipitación menor a 800 mm, pero en cambio pueden soportar hasta 1300 o 1600 mm, así que en las selvas centroamericanas las especies dominantes son epigeas —devoradoras de restos vegetales— o bien endógeas —humívoras— (Anderson y Flanagan 1989). En experimentos de laboratorio con *Aporrectodea caliginosa* sobre suelos degradados de Nueva Zelanda (Beare et al. 2004), se lograron incrementos en el crecimiento y la asimilación de nitrógeno de plantas de trigo o de trébol, y también mejor agregación del suelo. Scheu (2004) revisó 67 estudios que comprobaron el incremento significativo en la producción de brotes en

cereales y pastos por influencia de las lombrices, señalando que éstas también influyen sobre los herbívoros de manera positiva en algunos casos y negativa en otros, y constituyen una fuente de alimento subsidiaria para predadores cuando sus presas escasean.

Los efectos de la actividad de las lombrices en suelos de zonas templadas son favorables en general, según la mayoría de los autores. Afectan a la vez la porosidad, la aireación, la penetración de raíces, la retención de agua, y la actividad bacteriana (Lee 1985). La formación de agregados estables debida a la actividad de los oligoquetos del suelo (lumbrícidos y enquitreidos), protege físicamente a la materia orgánica y disminuye su tasa de descomposición (Didden y Marinissen 1994), efectos que son mayores conforme es menor el tamaño de los agregados; éstos últimos —sugieren— son producidos por enquitreidos. Joschko et al. (1994) confirman que la actividad de los lumbrícidos contribuye a la variabilidad estructural y a la conductividad hidráulica de los suelos a través de la formación de macroporos. Los humatos extraídos de vermicompostas aumentan el crecimiento de plantas de hortaliza (Atiyeh et al. 2002).

En suelos tropicales caoliníticos las lombrices endógeas desempeñan un papel preponderante en la formación y conservación de la estructura del suelo (Blanchart 1999). Aumentan la proporción de agregados mayores a 2 mm, la macroporosidad y la microporosidad, y hacen decrecer la porosidad total con sus heces. Forman agregados con mayor capacidad de retención de agua, mayor estabilidad estructural frente al agua y mayor resistencia mecánica que los formados por las raíces, pero en ausencia de residuos orgánicos pueden dar lugar a la formación de un horizonte impermeable, por lo cual se les atribuye el papel de *compactadoras*.

Las lombrices *descompactadoras*, en cambio, producen heces pequeñas, granulares, mayor proporción de agregados de tamaño medio (0.5 a 2 mm) a expensas de los agregados mayores, aumentan la meso porosidad y la porosidad total (disminuyen la macro y microporosidad), reducen la capacidad de retención de agua, y la estabilidad estructural de sus heces frente al agua es más baja que

en el caso de las especies compactadoras (Blanchart 1999). Las lombrices de gran tamaño incrementan la macroporosidad y la rugosidad superficial, y pueden así reducir la erosión del suelo ya que facilitan la infiltración y reducen los deslizamientos de terreno superficiales (solifluxión).

Las lombrices también son útiles en el mejoramiento de suelos en los países tropicales, como lo indica la diversidad de veintiséis especies utilizadas en vermicomposteo (Barois 1999). En Nigeria las lombrices contribuyeron a aumentar el contenido de materia orgánica del suelo (Hauser et al. 1994), transformando en materia orgánica edáfica una porción grande de la biomasa producida por las plantas; retardan la mineralización y la pérdida por lixiviado, y dan lugar a una fuente estable de nitrógeno. En la India, Senapati et al. (1994) ratificaron que la actividad de las lombrices (especies nativas en bosques, *P. corethrurus* en suelos degradados con cultivo de té negro,) mejora la agregación de los suelos, y en cambio, en la Amazonia peruana Desjardins et al. (2004) encontraron que las lombrices *Pontoscolex corethrurus* producen una mayor mineralización del carbono orgánico ya sea en bosque o en maizal.

Reddy y Ohkura (2004) probaron en la India el vermicomposteo con *Perionyx excavatus*, *Octochaetona phillotti* y *Octonochaeta rosea* combinando paja de arroz, vermicomposta de ésta y suelo con mejores resultados al realizarlo en los tres substratos. Ramalingam y Thilagar (2000) ensayaron el vermicomposteo con *Perionyx excavatus* sobre bagazo de caña de azúcar con y sin estiércol vacuno madurado 21 días; el bagazo fue desfavorable a la lombriz y a la biodegradación, mientras la mezcla favoreció a la lombriz y dio lugar a una vermicomposta cuyos niveles de nutrimentos resultaron significativamente más altos. En cambio, Bansal y Kapoor (2000) ensayaron el vermicomposteo de bagazo de caña y estiércol vacuno con *Eisenia foetida*, que resultó en un aumento de la actividad microbiana hacia el día 60 y una significativa reducción de la proporción C/N, pero sin diferencia significativa en los contenidos totales de P y K. Jeyabal y Kuppaswami (2001) comprobaron un mejor rendimiento y mayor absorción y aprovechamiento de nutrientes por plantas en arroz y legumbres, al aplicar vermicomposta (de corteza de coco, bagazo de caña, hierbas, sedimento de aguas negras urbanas y

estiércol, trabajados por *Eudrilus eugeniae*) comparada frente a un fertilizante nitrogenado.

En la región tropical oriental de México, Fragoso y Rojas (1994) encontraron que las lombrices resultan más abundantes pero menos diversas en las zonas perturbadas (224 individuos, $43 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ con 4 especies por agrosistema), frente a las selvas (10 especies promedio). Las especies exóticas más extendidas fueron *Pontoscolex corethrurus*, *Dichogaster bolau*, *D. saliens*, *D. affinis*, *Amyntas gracilis*, *Polypheretima elongata*; las nativas más extendidas, *Balanteodrilus pearsei*, *Notiodrilus salvadorensis*, *Lavello-drilus parvus*, cuyo rango geográfico está relacionado con su modo de vida epigeico-polihúmico.

Uribe (2004) estudió la relación entre comunidades de lombrices y algunas propiedades físicas y químicas de suelos, en cacaotales de distinta antigüedad al pie de la Sierra Madrigal, y en una selva mediana subperennifolia de "ramón" *Brosimum alicastrum* en Tabasco. Reporta en total 14 especies de lombrices, 8 nativas y 6 exóticas. La selva presentó 5 nativas y una exótica; los cacaotales con manejo 2 especies nativas y 5 exóticas; y el cacaotal en descanso, 1 nativa y 3 exóticas. Las especies más abundantes fueron: *Pontoscolex corethrurus* en los cacaotales y en la selva; en segundo lugar, *Dichogaster bolau* en los cacaotales y *Balanteodrilus pearsei* en la selva. Las lombrices (endogeas polihúmicas en su mayoría) estaban en los 10 cm superficiales en una proporción de 77 a 96%, tendencia relacionada con patrones filogenético-geográficos y con la riqueza de los suelos en el trópico húmedo de México (Fragoso y Lavelle 1992). En los suelos, la densidad y la biomasa de las especies más abundantes ($P < 0.05$) presentaron una correlación positiva con el potasio posiblemente derivado de la hojarasca ($r > 0.8$) y el sodio ($r = 0.7$); en cambio, no hubo correlación con el calcio, y con el carbono orgánico total fue apenas moderada o baja.

En los últimos años se ha trabajado en Tabasco el vermicomposteo de cascarilla de cacao con lombriz "roja de california" (Fraire 1998), logrando un fertilizante orgánico al cual denominan "Biocac" que aporta nitrógeno, fósforo y potasio a los suelos y aumenta sus contenidos en materia orgánica; en el año

2000 reportaban también aumentos en el desarrollo de plantas de maíz (Zarracino et al. 2000). Actualmente, investigadores del Instituto de Ecología, el Colegio de la Frontera Sur, el Colegio de Postgraduados Chapingo, han desarrollado muchas investigaciones respecto a lombrices, su ambiente y su papel en esta región.

En el presente trabajo se propuso obtener humus a partir de la cascarilla de cacao mediante composteo y vermicomposteo. Se consideró que las lombrices de los cacaotales serían epigeas, consumidoras de hojarasca, que requieren buena aireación, humedad mediana, temperatura entre 22 y 28 grados, pH cercano a neutro. Su crianza requeriría de humedad entre 50 y 60 %, oxígeno en proporción mayor a 15%, CO₂ en proporción menor a 6%, presencia de materia orgánica, y calcio en \approx 1%. Adaptadas al consumo de hojarasca y desechos vegetales del cacao, serían más tolerantes a la cascarilla tostada. Las especies presentes en cacaotales antiguos de Tabasco en Teapa y Huimanguillo, vistas durante prospecciones de suelos desde 1994 hasta el 2004, están ya adaptadas tanto a las condiciones de temperatura y humedad relativamente elevadas como al consumo de hojarasca y de restos vegetales del cacao, y resultaron prometedoras al inicio de este trabajo para emplearse en el vermicomposteo. La especie dominante en el cacaotal de origen y en el composteo fue *Pontoscolex corethrurus* Muller 1956, “exótica originaria del norte de América del Sur” (Fragoso 2001), que resultó adecuada para los fines de humificación de la cascarilla, como se verá más adelante. Pionero en su momento (Molina y García 2000), al 2012 se han publicado numerosos trabajos respecto a las lombrices de la región, su papel en los suelos y sus potencialidades en vermicomposteo o lombricultura (Fragoso 2001, Huerta et al. 2005, Huerta et al. 2007, Huerta et al. 2009).

4. – MATERIAL Y MÉTODOS

La cascarilla de cacao tostada fue proporcionada por la Industrializadora de Cacao de Tabasco S. A. (carretera Circuito del Golfo km 407, Cárdenas, Tabasco). La composta se obtuvo de esta cascarilla sometida a composteo en pila (el procedimiento se describe en el apartado 7.2). Las lombrices, *Pontoscolex corethrurus* (Müller) se obtuvieron de un cacaotal en descanso con árboles de 25 años, al pie del Cerro Madrigal de Teapa, Tabasco, con 83 lombrices·m⁻², de un suelo que se ha clasificado como Lixisol háplico (Driessen et al. 2001). El vermicomposteo de la cascarilla se desarrolló en un Fluvisol éutrico (Palma y Cisneros 1996).

4.1 – Pruebas previas al composteo y al vermicomposteo.

En primer lugar, se ensayaron los efectos que la cascarilla o su extracto pudiesen causar sobre plantas cultivadas.

a) Prueba de el efecto de extracto de la cascarilla sobre plantas de maíz (*Zea mays* L.), ¿inhibidor o estimulante?

Se preparó extracto de cascarilla en agua destilada, 10 g de cascarilla de cacao tostada con un litro de agua destilada, siguiendo a Anaya (1999); 10 g·L⁻¹ = 100%, a partir del cual se prepararon 5 diluciones distintas (blanco o 0%, 20, 40, 60, 80 y 100%; Tabla 4.1). En un diseño monofactorial de bloques al azar, con 6 niveles de extracto y 5 repeticiones, se sembraron dos semillas de maíz certificado (*Zea mays* var. H-24) en cada una de treinta macetas que contenían un kilogramo de suelo (“tierra negra”, epipedión mólico de un Fluvisol éutrico). Se mantuvieron en invernadero, cuya temperatura ambiente oscilaba entre 30 y 36 °C; la humedad fue la del ambiente. Los tratamientos consistieron en regar con el extracto de cascarilla en agua destilada (Anaya 1999), conforme se establece en la Tabla 4.1.

Cada maceta se regó con 100 cm³ de la dilución correspondiente, en períodos de 48 horas. Se evitó la entrada de agua de lluvia tapando con platos de plástico perforados para darle salida al tallo de la planta.

Tabla 4.1 – Tratamientos con extracto de cascarilla ($10 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} = 100\%$)

Lote	Macetas, número	Agua, cm^{-3}	Extracto ($\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3} \text{H}_2\text{O}$)	Proporción de extracto
A	1 al 5	1000	0	(Blanco)
B	6 al 10	800	200	20%
C	11 al 15	600	400	40%
D	16 al 20	400	600	60%
E	21 al 25	200	800	80%
F	26 al 30	0	1000	100%

Se monitoreó el desarrollo de las plantas durante 64 días, al cabo de los cuales se suspendió el experimento por presencia de plaga, hormiga negra (*Hypoponera* sp, Fernández 2003). Se registraron: el tamaño de cada planta, medido desde donde emerge el tallo hasta donde inicia la inflorescencia o espiga, el número de sus hojas, y el número de mazorcas.

Dados los resultados que indicaron un efecto favorable con 20% y 40% de extracto se realizó otro experimento monofactorial con 3 niveles del factor y 7 repeticiones: 21 macetas de 2 kg de capacidad con 2 semillas cada una, formando tres lotes de 7 macetas con los tratamientos de 50% de extracto, 25% de extracto, y blanco, y se monitoreó el desarrollo de las plantas durante 105 días; se midieron y registraron el tamaño de cada planta, el número de sus hojas y el de sus mazorcas. Los resultados se sometieron a la prueba estadística de diferencia de medias (Rubio 2003).

b) Prueba de vermicomposteo de la cascarilla en invernadero.- Con el fin de definir la dosis de cascarilla más adecuada para mejorar los parámetros de fertilidad del suelo, y a la vez para la cría de lombrices, se ensayó su cría en macetas bajo condiciones de invernadero.

- Se colectaron 300 lombrices epigeas, principalmente *Pontoscolex corethrus* (Müller 1857) —INECOL Xalapa, Veracruz— en el cacaotal al pie del Cerro Madrigal, que se conservaron en suelo del mismo cacaotal previamente depositado en recipientes de polietileno de 15 cm de profundidad, 20 cm de ancho y 25 cm de largo.
- Se formaron 20 macetas con 1 kg de suelo, cada una considerada un lote experimental, numeradas de 1 a 20. A cada maceta se le agregó cascarilla sobre el suelo en las dosis que se indican en la Tabla 4.2. La cantidad de cascarilla (densidad aparente $0.23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) se definió partiendo de que una capa de un centímetro de grosor equivale a 100 % de cobertura: $2300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.

Tabla 4.2 – Tratamientos con extracto de cascarilla ($10 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3} = 100\%$)

Cuba núm.	Peso inicial en g *	Cobertura cascarilla, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	Cuba núm.	Peso inicial en g *	Cobertura cascarilla, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$
1	1000	0	11	1047.5	1380
2	1000	0	12	1047.5	1380
3	1015.8	460	13	1055.4	1610
4	1015.8	460	14	1055.4	1610
5	1023.7	690	15	1063.3	1840
6	1023.7	690	16	1063.3	1840
7	1031.6	920	17	1071.2	2070
8	1031.6	920	18	1071.2	2070
9	1039.5	1150	19	1079.1	2300
10	1039.5	1150	20	1079.1	2300

*1000 g de suelo iniciales.

- Se depositaron 5 lombrices (peso medio 186 mg el individuo adulto) en cada maceta y se regó diariamente con 50 cm^3 de agua (50 g agua / 1000 g de suelo: 5% de humedad en peso). Cada tercer día se pesó cada maceta y se contaron las lombrices en las macetas pares. Se registró también la presencia

de micelio, y el porcentaje que de la superficie del suelo cubría en cada maceta, para obtener una estimación semicuantitativa.

- El día 81 se contaron las lombrices de cada maceta y el suelo se dejó secar. Se estimó la cantidad de agregados, seleccionándolos manualmente para dividirlos en cuatro categorías conforme a su “diámetro mayor” (Pape y Legger 1994): 20 a 50 mm, 10 a 20 mm, 5 a 10 mm, y 2 a 5 mm considerando la estructura en bloques subangulares. La estructura granular incluye agregados de menor tamaño: granular media 2 a 5 mm, y se consideró en la categoría “granular fina” a todos los agregados menores a 2 mm. Según Pape y Legger (1994) la categoría granular fina considera agregados de 1 a 2 mm, y la granular muy fina < 1 mm, pero con el fin de no desintegrar los agregados durante la manipulación requerida para observar y contar agregados muy finos, no se consideró la última.
- En los suelos se determinaron: la densidad aparente (DA) (Domínguez y Aguilera 1982), el carbono orgánico total (COT) (Nelson y Sommers 1982), la capacidad de intercambio catiónico CIC (método del versenato, Domínguez y Aguilera 1982).

Los resultados se procesaron para definir tendencias por método gráfico y estadísticas elementales (media, línea de tendencia, manejando los datos con Microsoft Excel Office XP 2000).

c) Ensayo de respuesta de las lombrices a distintas proporciones de cascarilla, en bandejas con suelo. – Empleando un diseño bifactorial con dos repeticiones y cinco proporciones distintas de cascarilla depositada sobre la superficie, dentro de bandejas de polietileno de 30 × 25 × 13 cm (equivalentes a 8 dm³) se depositaron 2300 g de suelo, cascarilla en las cantidades y proporciones que se indican en la Tabla 4.3, y en cada bandeja se depositaron 8 lombrices. Los componentes fueron:

- Suelo colectado bajo un cacaotal en Teapa (horizonte superficial, excluyendo manualmente la edafofauna y los restos vegetales mayores a 5 mm de diámetro)

- Cascarilla de tamaño variable (1 mm² a 2 cm²)
- Lombrices colectadas en el terreno del cacaotal.

Tabla 4.3 – ensayo de respuesta de lombrices a la cascarilla, en suelo

Bandeja número	Suelo (g)	Cascarilla (g)	Cobertura de la superficie con Casc*	Lombrices, núm. inicial	Cascarilla, g·100 g ⁻¹ de suelo
1	2,300	0	0	8	0
2	2,300	0	0	8	0
3	2,300	37	13%	8	1.6
4	2,300	37	13%	8	1.6
5	2,300	75	27%	8	3.26
6	2,300	75	27%	8	3.26
7	2,300	112	40%	8	4.87
8	2,300	112	40%	8	4.87
9	2,300	150	54%	8	6.52
10	2,300	150	54%	8	6.52

* 750 cm² se cubren con 75 g de cascarilla para dosificar 0.1 g·cm⁻². Las dosis son 0.05, 0.10, 0.15 y 0.20 g por cm⁻².

Se realizó un registro, de cada lote, incluyendo pruebas cuantitativas y cualitativas:

Número del lote

Humedad del suelo: saturado (agua brillando en la superficie), a capacidad de campo (sensible: oscuro y friable, un poco más frío que el ambiente), seco (color claro, temperatura igual a la ambiente, poco peso).

Agregados: forma o tipo, tamaño o clase, consistencia o grado (Valencia y Hernández 2002), y asociación con la cascarilla; tipo, tamaño; y proporción de agregados respecto al todo estimada en la superficie de la bandeja, área que ocupan los agregados contra el área total.

Lombrices: número, tamaño (con regla milimétrica, sometidas a extensión suave) y condición de las lombrices (Compagnoni y Putzolu 1995); y presencia de capullos.

Cascarilla (pruebas cualitativas):

- superficie: entera o irregular; sin huellas de actividad de organismos, o manchada o carcomida; cambios en el color, decoloración u oscurecimiento;
- Bordes: enteros o irregulares, huellas de actividad de organismos; manchas, color, y sus respectivos cambios.
- Olor: aroma de cacao, o un olor distinto (los más frecuentes: a tierra, a pasto, dulzaino, acre, a levaduras, a vegetación descompuesta) o ninguno.
- Agregación de la cascarilla: suelta o libre, o cubierta con partículas de suelo, o adherida al suelo integrando un agregado; proporción por tipo y tamaño estimada en la superficie del suelo contenido en la bandeja.
- Presencia de micelio, y condición: localización (si se encontraba fuera o sobre la cascarilla, si cubre sólo la cascarilla o forma un tapete continuo sobre el material del suelo), apariencia —fibrosa como algodón, o esférulas de color claro, o pulverulenta de esporas— estimando el porcentaje de la superficie que el micelio cubría.

El experimento se montó el 10 de septiembre, regando diariamente con 9 g de agua (con atomizador) que equivalen a 1.2% de humedad para la capa superficial, durante 48 días.

4.2 – Composteo de la cascarilla de cacao: metodología.

El proceso de composteo implica: 1) coleccionar los desechos, 2) prepararlos (seleccionarlos, molerlos y homogeneizarlos), 3) fermentarlos y oxidarlos o “el composteo propiamente dicho”, 4) tratar los malos olores, 5) el curado o maduración de la composta, 6) tamizar o refinar el material, y 7) almacenarlo y empacarlo ejerciendo los controles previos a su distribución (Mustin 1987, TMECC 2001).

Es indispensable medir, previamente, parámetros físicos que influirán en la aireación, y parámetros químicos (los contenidos de elementos) del sustrato,

importantes para producir energía y para proporcionar nutrientes a los microorganismos.

a) **la cascarilla de cacao como sustrato para el composteo.**- La cascarilla de cacao no requiere selección, ya que se obtiene en la beneficiadora de cacao, tostada y separada de la semilla por venteo, sin otros materiales agregados, prácticamente limpia.

El grosor de la cascarilla es aproximadamente medio milímetro, y las hojuelas llegan a medir entre 2 mm y 3 cm de diámetro. Una vez tostada la cascarilla se vuelve quebradiza, y la mayor parte de las hojuelas que se recogen de los colectores ciclónicos son menores a 1 cm, tal como se empacan en costales y se entregan al comprador. Su tamaño es suficientemente grande para la aireación, a la vez que es suficientemente pequeño para su humedecimiento: no requiere molerla para su composteo en pila.

Para valorar en la cascarilla:

- el porcentaje de humedad,
- el porcentaje de cenizas,
- porcentaje de fibra cruda,
- porcentaje de nitrógeno,
- porcentaje de grasas,

Se siguieron los métodos descritos por Whitehouse y Picos (1984): 2 g de cascarilla se secan a 70 °C hasta peso constante y se pesan nuevamente, se desgrasan con xilol (a 140 °C) en Soxhlet, luego se someten a digestión con ácido sulfúrico y con NaOH, y finalmente se incineran.

- El contenido de carbono se determinó utilizando la técnica de Walkley y Black (Nelson y Sommers 1982), cinco repeticiones, el promedio.
- El nitrógeno total se determinó mediante el método Kjeldahl (Jones et al. 1991; Van Reeuwijk 1999), tres repeticiones.

b) **Estimaciones para el composteo en pila de cascarilla de cacao.** Los contenidos de minerales en la cascarilla se estimaron inicialmente con datos

de Chatt (1953): Cenizas totales 5 a 8 g·100 g⁻¹ (media 6.5, cascarilla sin grasa); Fe₂O₃ 0.01 %; MgO 0.09 %; CaO 0.04 %; K₂O 0.4 %; Na₂O 0.05 %; SiO₂ 0.01 %; SO₂ 0.03 %; P₂O₅ 0.09 %; Cl 0.04 %. Se asume que su contenido de agua libre antes del tostado es semejante al de la semilla (3.6 %), y después del tostado se reduce prácticamente a cero; y la proporción de fibra era 16.75 g·100 g⁻¹ d.

Tabla 4.4 – Estimación del contenido de carbono en la cascarilla de cacao

Componente de la cascarilla: peso del Carbono en la molécula	Proporción de C g/100 g de componente	% del componente en la cascarilla	Porcentaje de C en el peso total
Celulosa (72 × 100) / 178	40.4	28.15	11.387
Xilano (60 × 100) / 148	40.5	4.94	2.001
Acetil (24 × 100) / 43	55.8	1.43	0.798
Pectina, (72 × 100) / 178	40.45	5.9	2.386
Ác. péctico (72 × 100) / 178	40.45	4.5	1.820
Grasas: 53%			
(192 × 100) / 256	75.0	12.932	9.699
(216 × 100) / 284	76.6	18.762	14.372
(216 × 100) / 282	76.6	20.193	15.468
(216 × 100) / 256	84.4	1.113	0.939
Teobromina (84 × 100) / 258	32.6	1.71	0.557
Suma	(~56.28 %)	99.63	59.427

El oxígeno necesario para oxidar la cascarilla se estimó considerando los componentes de este material vegetal (Chatt 1953, Minifie 1989). Retomando la composición de la cascarilla (Tabla 4.4), se presentan los cálculos en la Tabla 4.5.

c) Composteo en pila. - Se formó una pila con 50 kg de cascarilla de cacao, con las siguientes dimensiones: 125 cm de ancho, 75 cm de altura, y 180 cm de longitud, un volumen de 840.94 dm³. La densidad aparente de la cascarilla, determinada en laboratorio con el método de la probeta (Dominguez y Aguilera 1982) fue de 0.27 g·cm⁻³. (Nota: el volumen de la pila calculado a partir de la densidad aparente sería

766,283.5 cm³, y es menor a las dimensiones de la pila porque el método conlleva acomodar el material golpeando la probeta).

Tabla 4.5 - Estimación del oxígeno necesario para el composteo de cascarilla de cacao

COMPO- NENTE	Fórmula media; molécula- gramo	% en la cascarilla	O ₂ necesario	O ₂ necesario / mol del componente	O ₂ nece- sario g/ 100g de cascarilla	g O ₂ / g de MO oxidada.
Celulosa	(C ₆ H ₁₀ O ₆)n 178	28.15	5.5 × 32	176	4,954.40	0.989
Xilano	(C ₅ H ₈ O ₅)n 148	4.94	4.5 × 32	144	711.36	0.973
Acetil	(C ₂ H ₃ O)n 43	1.43	2.25 × 32	72	102.96	1.674
Pectina	(C ₆ H ₁₀ O ₆)n 178	5.9	5.5 × 32	176	1,038.40	0.989
Ácido péctico	(C ₆ H ₁₀ O ₆)n 178	4.5	5.5 × 32	176	792.00	0.989
Grasa 53% (ácidos grasos:						
palmítico 24.4%	C ₁₆ H ₃₂ O ₂ 256...	12.932	23 × 32	736	9,517.95	2.875
esteárico 35.4%	C ₁₈ H ₃₆ O ₂ 284...	18.762	26 × 32	832	31,219.97	2.929
oleico 38.1%	C ₁₈ H ₃₄ O ₂ 282...	20.193	26.5 × 32	848	17,123.66	3.007
linoleico 2.1%)	C ₁₈ H ₃₂ O ₂ 256...	1.113	25 × 32	800	890.40	3.125
Teobromina	C ₇ H ₈ N ₃ O ₂ 258	1.71 %	11 × 32	352	601.92	0.012
		Suma 99.63 %			M = 6,695.30	X = 1.756

Datos retomados de Minifie 1989; fórmulas químicas condensadas Karrer 1965, Meyer *et al.* 1966. M = media en gramos de O₂ por 100 g de cascarilla; X = media en gramos de O₂ por gramo de materia orgánica oxidada.

Como **inóculo** se agregaron a la pila 100 g de suelo (horizonte A del cacaotal de Teapa), espolvoreado al humedecerla, y se mezcló.

La cascarilla requería un porcentaje de humedad de 70% semejante al que requieren la paja o el aserrín (Mustin 1987); pero no retiene agua al inicio, por lo cual se agregaron 15 dm³ de agua mezclando la cascarilla, para lograr un 30% de

humedad; 10 dm³ más de agua a las 17 horas (día 1), 10 dm³ a las 38 horas (día 2), 10 dm³ a las 63 horas (día 3), mientras se determinaba la temperatura cada dos horas; después se agregaron los 10 dm³ en los días 7^o, 10^o, 13^o y 17^o.

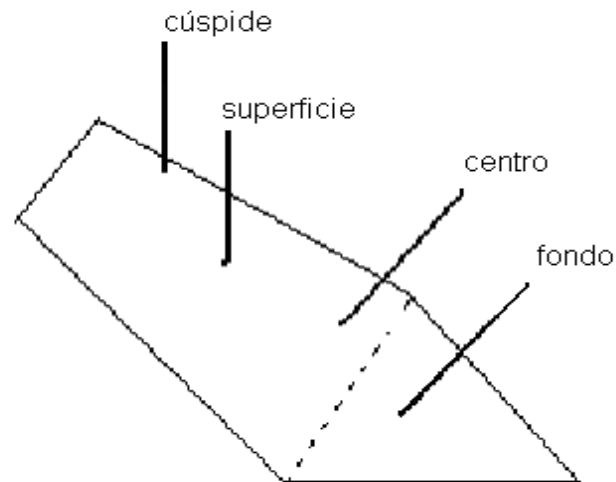


Fig. 4.1 – Pila de cascarilla, posición del termómetro al medir temperatura

Para evitar la invasión por insectos se cubrió con mosquitero.

Se midió con termómetro de mercurio (0 a 100 °C) la temperatura ambiente, y también la de la pila en cuatro puntos, como se indica en la Fig. 4.1: en su cúspide, en la superficie de una cara rectangular, en el centro de la sección transversa, y en el centro de su base (fondo).

Con el fin de verificar los aumentos correspondientes a la fase termófila se midieron las temperaturas cada dos horas, hasta la hora 218; después del 9^o día se midió cada 24 horas, a las 11:00, con el fin de definir el momento de la estabilización, cuando la variación térmica fuese ya muy poca. Las máximas, mínimas y tendencias (regresión) se calcularon usando el programa Microsoft XP Excel (2003).

El composteo en pila se desarrolló tres veces: marzo de 2002, junio de 2002, y febrero de 2003. En la primera vez se tomó la temperatura sólo a las 8 AM y a las 8 PM, dos veces al día conforme a la información de diversos autores; al observarse cambios drásticos durante las primeras horas, se decidió desarrollar

los monitoreos en los experimentos siguientes, tomando las temperaturas cada hora, con registros más completos.

1 2160 g	2 1890 g	3 0 g	4 1350 g
5 1350 g	6 2160 g	7 1620 g	8 1890 g
9 1080 g	10 1080 g	11 1620 g	12 1620 g
13 0 g	14 1350 g	15 1080 g	16 2160 g
17 1350 g	18 2160 g	19 1350 g	20 0 g
21 0 g	22 1080 g	23 1890 g	24 1080 g
25 1620 g	26 1350 g	27 2160 g	28 1620 g
29 1890 g	30 1620 g	31 2160 g	32 1080 g

Fig. 4.2 – Configuración de los lotes experimentales en el terreno (g de cascarilla): 6 repeticiones, distribución al azar

4.3 – Prueba de vermicomposteo en capa delgada, en campo.

Se prepararon lotes de 1 m² mezclando con tierra negra 6 cm. de espesor, hasta 12 cm. de profundidad, el horizonte superficial de un Gleysol éutrico (Palma y Cisneros 1996) en la Ranchería Anacleto Canabal (Tabasco, Municipio Centro: 93° 00' 13.07" W, 17° 58' 04.16" N, altitud 9 msnm), y aislando cada lote al introducir en el suelo lámina de polietileno de color negro hasta 30 cm de profundidad, dejando sobresalir 10 cm. Con un diseño de bloques completos al azar, en cada lote se depositó cascarilla en proporciones definidas a partir de su

densidad aparente ($0.27 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) para cubrir con un centímetro de grosor el suelo: $100\% = 2700 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. (Fig. 7.2). Las distintas proporciones fueron $0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ como control, $1080 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ o 40% , $1350 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ o 50% , $1620 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ o 60% , $1890 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ o 70% , y $2160 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ u 80% (Molina y García 2009).

Los lotes se cubrieron, a un metro y medio de altura, con malla para sombreado equivalente a 40% de sombra, semejante a la que había en el cacaotal en el cual se recolectaron las lombrices (Puyacatengo, Teapa). Dentro de cada lote se depositaron inicialmente 10 lombrices. Se regó cada dos días hasta capacidad de campo, eliminando las hierbas espontáneas diariamente. Se observó la condición de las lombrices (Compagnoni y Putzolu 1995) y la presencia de micelio sobre el suelo 66 días después (abril-junio): se examinaron los 10 cm superficiales en cada lote y se separaron las lombrices para evaluarlas.

Proporción de micelio.- Se estimó la superficie que cubría el micelio algodonoso algodonoso —como posible alimento de las lombrices— sobre la superficie del suelo en cada lote, cada día, mediante un marco de madera de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ con un cordel (tensado de una arista a la opuesta) cada 10 cm, considerando las fracciones menores reunidas en un cuadrante.

4.4 - Pruebas de preferencia de las lombrices por la cascarilla sin tratar o por la composta de cascarilla.

Con el fin de probar la preferencia de las lombrices, en el suelo, por la cascarilla o por la composta, se desarrollaron experimentos en invernadero y en campo.

a) - Prueba de invernadero.

Se dispusieron dos cajones de madera de 120 cm de largo por 80 cm de ancho por 10 cm de profundidad, dentro de las cuales se depositó suelo hasta los 8 cm.

Los cajones se orientaron en dirección norte-sur, y en un cajón se depositaron $2080 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (80%) de cascarilla en la mitad oriente y $2080 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de

composta en la mitad poniente, y en el otro cajón la cascarilla y la composta en situación invertida, para definir algún efecto de orientación en las preferencias de las lombrices.

Se dejó una franja de 4 cm, libre, entre lote de composta y de cascarilla, sobre la cual se depositaron 10 lombrices después de regar por primera vez.

Se regó con 4 litros de agua, diariamente.

A los 17 días de montado el experimento, se revisaron los cajones buscando lombrices.

b) - Prueba en campo.

Se montó un experimento en el terreno de la Ranchería Anacleto Canabal (Tabasco, Mpio. Centro) mezclando el horizonte superficial del suelo local (Fluvisol éutrico, INEGI 1986) con tierra negra, ocupando áreas de 2×2 metros, 4 m^2 utilizando $920 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (40%) de cascarilla, y 4 m^2 con $920 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (40%) de composta.

Sobre cada área se depositaron 10 lombrices, y se regaron con agua diariamente, un litro por m^2 . Cuarenta y ocho días después (marzo-abril) se evaluaron, extrayendo manualmente (Smith *et al.* 2008) y contando las lombrices encontradas, al excavar hasta 30 cm de profundidad en una franja de la 5ª parte del área (0.8 m^2), a partir de lo cual se estimó la producción total. Los resultados se sometieron a prueba de ANOVA, $P < 0.05$ (Rubio 2003).

Los suelos se sometieron a secado al aire, molienda y tamizado para desarrollar las determinaciones que se definen en en apartado 4.6.

4.5 – Ensayo del efecto de la vermicomposta en un cultivo de maíz (*Zea mays* L.)

Se montó un experimento en un terreno ($92^\circ 55' 42.08'' \text{ W}$, $17^\circ 49' 48.02'' \text{ N}$) de 29 por 21 m, 609 m^2 , cuyo suelo corresponde a Acrisol húmico (Palma y Cisneros 1996). El terreno, utilizado para cultivo de flores pero en descanso desde 6 meses antes, estaba cubierto con hierbas y arbustos (acahual), y con árboles de

melina (*Gmelina arborea* para el sombreado). Se talaron los árboles, se extrajeron los tocones y raíces más gruesas, y se limpió el terreno dejándolo sin hierbas. La tierra se mezcló con pala y azadón tres veces, para homogeneizarla, y se alisó el terreno.

El diseño inicial fue de bloques al azar. Se definieron los lotes de 5 × 5 metros, veinte lotes en total (cuatro por fila dirección NW-SE, cinco filas dirección NE-SW). Se surcó en dirección norte-sureste (perpendicular a la pendiente) y se formaron hileras a todo lo ancho del terreno; cuarenta puntos para sembrar, por hilera (dejando un paso a la mitad). Se numeraron los lotes y se asignaron tratamiento (con composta) y testigo (sin composta) al azar (Montgomery 1991), como se representa en la Fig. 4.3.

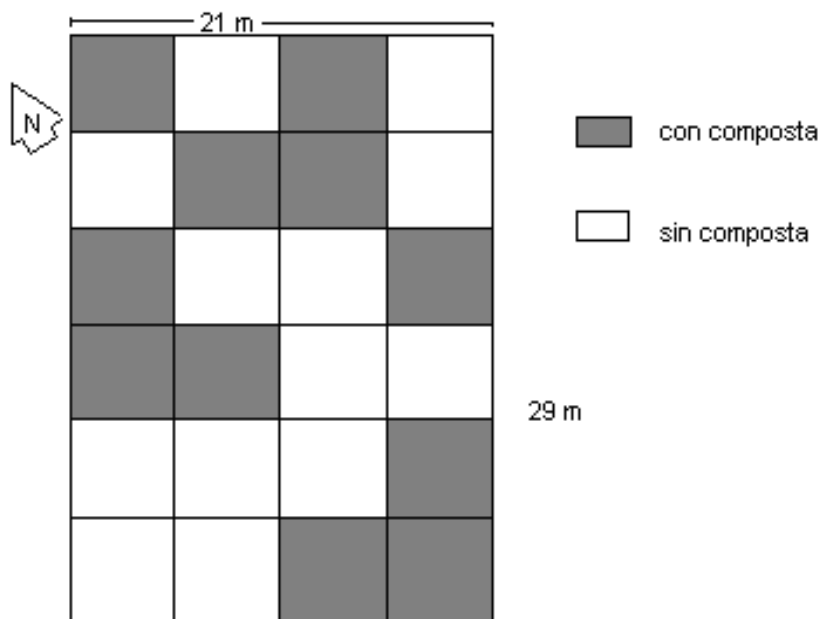


Fig. 4.3 - Efecto de vermicomposta en maíz, 1^{er} experimento, disposición de lotes

En huecos producidos con cavahoyos (12 cm diámetro × 12 cm profundidad) separados 70 cm y alineados en filas separadas un metro, se depositó un cilindro de suelo con vermicomposta. En cada cilindro se practicó una perforación con una vara de 3 cm de grueso, introducida de 5 a 6 cm, y se sembró maíz certificado. El sembrador siguió su costumbre en la primera siembra y depositó entre 5 y 7 semillas por punto. No se usaron pesticidas ni fertilizantes

para evitar interferencias con los efectos de la composta, y el agua para el cultivo se estableció en condiciones de temporal.

Se determinó el rendimiento en: el número y peso de mazorcas; el número de plantas desarrolladas por lote, la altura de las plantas, y la producción total en kg de semilla de maíz por tratamiento (Tanaka y Yamaguchi 1989).

A los seis meses se retiraron las plantas, se disgregaron los terrones, se mezcló muy bien la parte superficial del suelo (hasta 20 cm de profundidad) y se dejó reposar una semana, para montar de nuevo el cultivo modificando el diseño:

—se abrieron 27 surcos separados un metro, se extrajo una vez suelo con cavahoyos y se substituyó con vermicomposta (suelo enriquecido con composta de cascarilla y trabajado por lombrices) en los surcos pares. Los surcos 1 y 27 en su caso se excluyeron del análisis para disminuir sesgos por efecto de borde.

—Se sembró maíz certificado variedad H-24, dos semillas por punto, con vara, a 5 cm profundidad, en puntos separados un paso (unos 70 cm) en cada surco.

—Para evitar que entraran al cultivo roedores se aplicó cebo envenenado en el borde externo del terreno y entre los surcos, y para evitar que las aves se comieran los granos sembrados se instalaron espantapájaros y cordeles con láminas de latón.

—Al cosechar se registraron: el peso total de mazorcas y de grano, por tratamiento; por cada planta se registraron la altura de la planta, número de mazorcas y número de hojas.

—Al terminar el ciclo y desmontar el cultivo, se tomaron muestras del suelo bajo plantas de maíz con vermicomposta, y del suelo sin vermicomposta bajo las plantas de este cultivo.

4.6 – Definición de los efectos en los materiales y en los suelos.

- a) en los suelos, tanto en aquellos sin tratar como en los suelos tratados con cascarilla y con composta, se determinaron: la agregación, la densidad aparente, el carbono orgánico total por el método Walkley y Black, el nitrógeno total por Kjeldahl, y la capacidad de intercambio catiónico por el método de calcio-magnesio-versenato (Domínguez y Aguilera 1982).
- b) Para definir el grado de humificación de la materia orgánica, siguiendo los procedimientos descritos por García (2001), se desarrollaron análisis proximales de la materia orgánica (compuestos húmicos), procesando extractos de los 10 cm superficiales (Nascimento et al. 1993) de los suelos utilizados para formar la composta y los suelos del cultivo experimental en el cual se probó la eficacia de la composta (surcos con tratamiento y sin tratamiento en un cultivo de maíz), denominándoles de la siguiente manera:
- Gleysol éútrico sin enmienda pero con lombrices, “T sin”
 - Gleysol éútrico mezclado con cascarilla (composteo en capa delgada) con lombrices “Tcas”,
 - Gleysol éútrico mezclado con composta de cascarilla previamente madurada en pila, en el cual se criaron lombrices, denominado “T com”. Constituye la vermicomposta usada en el experimento con maíz en campo.
 - Acrisol húmico del terreno en que se sembró maíz (rancho de flores) sin tratamiento, “Rs”
 - Acrisol húmico en que se sembró maíz con vermicomposta, “Rv”.

Y se desarrollaron también análisis sobre los materiales sometidos a composteo, denominándoles

- “Kas” a la cascarilla sin tratamiento,
- “Com” a la cascarilla de cacao compostada en pila.

A partir de dichos materiales se determinaron los parámetros señalados en el inciso a), obteniendo luego los extractos por el método de Kononova (apartado

7.6.1) y por el método de Dabin (ambos descritos en García 2001). El residuo seco de los extractos según el método de Kononova se utilizó para obtener los espectros de infrarrojo a partir de su Transformada de Fourier (FTIR). Se aplicó también la técnica para determinar el **umbral de coagulación** (Kononova 1982) de los ácidos húmicos.

4.6.1 – Extracción y purificación de los ácidos húmicos.

Se utilizó el **Método Kononova (1982)** aplicándolo a la cascarilla y a la comoposta, y a los suelos Tsin, Tcas, Tcom, Rs, y Rv, que consiste en los procedimientos siguientes:

4.6.1 a – Método Kononova para la extracción y purificación de los ácidos húmicos

- 1) Se pesa el material (suelo seco al aire, molido y tamizado), con base en un gramo de carbono orgánico total.
- 2) Se prepara una suspensión con la cantidad de material definida en el párrafo anterior y 400 cm³ de la solución extractora de Kononova (8.0 g de NaOH + 89.2 g de Na₄P₂O₇, aforados a 2 dm³ con agua destilada; concentración 0.1 M). La suspensión se agita durante 16 (o hasta 24) horas; se deja que se asienten las partículas y se recoge el sobrenadante, el cual se centrifuga a 3500 rpm durante 20 minutos, sedimentando así las partículas de suelo, las cuales se desechan.
- 3) En el sobrenadante se separan las fracciones de ácidos fúlvicos (AF) y de ácidos húmicos (AH) (Lowe 1975), al agregar a la solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄: H₂O) 1:1 hasta un pH de 1.5 (definido con papel indicador). Se deja flocular durante 18 horas en la oscuridad, y se separa el nuevo sobrenadante que contiene la fracción de AF, sifonándolo hacia otro frasco.
- 4) El precipitado, formado por los AH, se centrifuga por 10 minutos a 3000 rpm recuperando el sobrenadante y sumándolo al obtenido en el paso 3, y el precipitado se lava agregando agua destilada, agitando, y centrifugando de nuevo a 3000 rpm dos ocasiones; se redisuelve agregando NaOH hasta obtener un pH de 12 (es conveniente usar NaOH 1M, pero puede substituirse con 0.3 g de NaOH que se disuelven en la suspensión), y se centrifuga a 12000 rpm, durante 15 minutos, para sedimentar las arcillas.
- 5) El sobrenadante obtenido en el paso 4 se decanta y se acidifica de nuevo para precipitar los AH, con H₂SO₄ 1:1, hasta alcanzar un pH de 1.5. Se deja flocular durante 12 horas, se centrifuga toda la suspensión a 3000 rpm durante 10 minutos, y se lava el precipitado resuspendiéndolo en agua destilada y centrifugándolo dos veces.
- 6) Con el fin de eliminar las sales, el precipitado de los AH en forma de gel se introduce con la menor cantidad de agua posible dentro de un tubo de membrana de diálisis (6000 D), previamente sumergido en agua destilada y anudado en un extremo (cerrando el otro extremo tras de introducir la suspensión). Se somete entonces a lavado con agua desionizada, introduciendo en ésta la bolsa cerrada (se favorece la diálisis creando corriente en el agua con agitador magnético) durante 48 horas y renovando el agua desionizada cada 12 horas, hasta que en el agua no se presenten sales.
- 7) El dializado se extrae del tubo, se deposita en una placa de Petri grande (15 cm de diámetro) y se deshidrata poniendo a desecar a 40 °C en estufa, durante 48 horas o hasta

que los AH se secan.

- 8) Del extracto obtenido en el paso 3, correspondiente a AF, se toma una alícuota de 150 cm³ que se introduce dentro de membrana de diálisis (6000 D) y se somete a lavado con agua desionizada, luego de lo cual se deposita también en caja Petri y se somete a desecación (AF totales).
- 9) El resto del extracto del paso 3 —AF— se hace pasar a través de una columna de polivinilpirrolidona (PVP Divergan R® BASF, previamente lavada con ácido hasta pH 1.5), que adsorbe los compuestos aromáticos pero no los alifáticos, y se lava con agua desionizada para eliminar las sales.
- 10) Se hace pasar cuidadosamente a través de la columna una solución de NaOH 0.5 M, la cual redissuelve los AF, que se recuperan en un vaso de precipitados (constituyen los AF coloreados retenidos en PVP).
- 11) La solución se hace pasar finalmente por una columna preparada con Amberlita IR-120 en forma H⁺ (lavada con ácido hasta pH 1.5), la cual retiene los iones sodio y deja pasar a los AF: se descarta el efluente incoloro inicial, se recupera el efluente coloreado y se suspende el flujo cuando termina de salir este último. El efluente coloreado se deposita en otra placa Petri y se deseca a 70 °C.
- 12) Los AH secos (paso 7) y los AF secos (paso 8; paso 11) se recuperan cuidadosamente de la placa Petri y se depositan en un frasco pequeño de vidrio color ámbar con tapa hermética (previamente tarado), para después pesarlos en balanza analítica, con lo cual puede estimarse la proporción que cada fracción guarda respecto al carbono orgánico total de la muestra.

4.6.2 – Análisis de las fracciones de la materia orgánica de los suelos. Se aplicó a los suelos Tsin, Tcas, Tcom, Rs y Rv, el fraccionamiento de la materia orgánica de los suelos siguiendo el método de Dabin (1971), el cual consta de los siguientes pasos:

4.6.1 b Análisis de las fracciones de la materia orgánica de los suelos, método de Dabin (1971)

- 1) Pesar 25 g de suelo e introducirlos en un tubo de centrifuga de 100 cm³, agregarles 75 cm³ de H₃PO₄ 2M (se produce efervescencia cuando hay carbonatos, en cuyo caso se agregan poco a poco, esperando hasta que no haya efervescencia)
- 2) Agitar durante 10 minutos en agitador mecánico, centrifugar durante 10 minutos a 3500 rpm y decantar sobre papel filtro Whatman n°1 (tarado y marcado) recogiendo el filtrado en un matraz aforado de 250 cm³
- 3) Repetir la adición de 75 cm³ de H₃PO₄ 2M, agitación y centrifugación decantando sobre el papel filtro, por dos veces más, y guardando el líquido (75 × 3 = 225 cm³).
- 4) Lavar el residuo que queda en el tubo de centrifuga con un poco de agua destilada, centrifugar y decantar en el mismo papel filtro la primera vez, de manera que se reúnan (aforando) 250 cm³ de extracto, el cual se guarda para el paso 6.
- 5) Lavar el residuo de nuevo con agua destilada (desechando el filtrado) hasta que el papel indicador no cambie a color rojo (pH > 4). Guardar el residuo de suelo para el paso 6.
- 6) Tomar 100 cm³ del extracto proveniente del paso 4 y evaporar en baño María hasta que queden 10 cm³, con los cuales se determina el carbono orgánico de la fracción **ácidos fúlvicos** del extracto de H₃PO₄ 2M o C_{AF}H₃PO₄. Si el extracto tiene un color muy oscuro, se

disminuye la alícuota del extracto para determinar el carbono.

- 7) Al residuo en el tubo de centrifuga proveniente del paso 4 se le añaden 150 cm³ de pirofosfato de sodio Na₄P₂O₇ 0.1 M, se agita por 10 minutos y se centrifuga durante 20 minutos a 3500 rpm, se decanta el sobrenadante y se guarda; esta extracción con pirofosfato se repite hasta tres veces (o hasta que el líquido sea prácticamente incoloro).
- 8) Al residuo en el tubo de centrifuga (del paso 7) se le aplica durante tres ocasiones extracción con 150 cm³ de NaOH 0.1 M (agitando y centrifugando para cada extracción) hasta que el líquido sea prácticamente incoloro, y el sobrenadante se añade a los extractos del pirofosfato.
- 9) Los sobrenadantes se aforan con agua destilada al volumen más próximo a 1 o 2 dm³. Se toman 100 cm³ de esta solución y se desecan a baño maría hasta dejar 10 cm³; esta fracción se considera que contiene los **ácidos húmicos** y los **ácidos fúlvicos**, AH + AF (se representa como C_{AH+AF}).
- 10) Se toma una alícuota de los 200 cm³ del extracto de AH + AF mezclado en el paso 9 y se les agrega H₂SO₄ (1:1, gotas) hasta pH 1.5. Se deja en reposo por 8 horas.
- 11) Se decanta el sobrenadante, y el precipitado se centrifuga y se lava dos veces (centrifugando cada vez) con H₂SO₄ a pH 1.
- 12) El residuo del tubo se redisuelve con NaOH 0.5 M, agitando y trasvasando, y se afora a 50 cm³. Una alícuota de 25 cm³ se evapora en baño María a sequedad para determinar el **porcentaje de carbono de los ácidos húmicos**, C_{AH}.
- 13) Se calcula entonces el **carbono de los ácidos fúlvicos extraíbles con reactivos alcalinos**, restando del carbono de los AH + AF, el carbono de los AH: [C_{AH+AF} - C_{AH}].
- 14) El residuo de las extracciones en el tubo de centrifuga (paso 8) se lava hasta eliminar las sales y se coloca en una cápsula de porcelana en la estufa a 40 °C, a sequedad; se pesa en balanza analítica, y se toman 0.5 g para determinar el **porcentaje de carbono de las huminas totales**.

4.6.3 – Análisis de las fracciones húmicas mediante espectrofotometría IR

De los AH purificados se pesan 2.0 mg, los cuales se depositan en mortero de ágata junto con 100 mg de bromuro de potasio, se muelen y mezclan perfectamente, y por sinterizado (compresión a 10,000 kg de presión en vacío: se comprime inicialmente sólo a 2800 kg·cm⁻² por dos minutos para expulsar los gases, luego hasta los 10 000 kg·cm⁻² de presión durante 5 a 10 minutos) se prepara un comprimido en forma de disco, el cual se introduce al espectrofotómetro IR para obtener el espectro.

Los espectros se obtuvieron con espectrofotómetro IR Bruker IFS 28, dentro del rango del Infrarrojo medio (4000 a 670 cm⁻¹). Se examinó con detalle el sector entre 2000 y 800 cm⁻¹, dentro del cual se encuentran las longitudes de onda significativas para grupos orgánicos aromáticos (Senesi *et al.* 1989, Skoog 1992, Stevenson 1994, Kalembasa *et al.* 1994, Dorado *et al.* 2001; Ver Tabla 4.6). Se

utilizó además un programa computarizado para mejorar la resolución del espectro original sustrayendo el espectro digital de un múltiplo de su segunda derivada (Almendros y Sanz 1992).

Los espectros FT-IR pueden presentar los rasgos siguientes (Senesi et al. 1989, Stevenson 1994, Kalembasa et al. 1994, Dorado et al. 2001):

En el espectro tipo I, obtenido a partir de la fracción ácidos húmicos:

- Hombros de 3710 a 3690, de 3695 a 3200 cm^{-1} (ó 3410 a 3390, o 3415 a 3385 cm^{-1}), y de 3310 a 3290 cm^{-1} : grupos **OH**.
- Hombro entre 2910 y 2890 cm^{-1} (o desde 2940 hasta 2850 cm^{-1}) que indica presencia de uniones carbono-hidrógeno: **grupos alifáticos**.
- Hombro entre 1730 y 1710 cm^{-1} : **grupos carboxilo**.
- Hombro entre 1660 y 1630 cm^{-1} que se reconoce como tensión (*stretching*): **doble enlace carbono-oxígeno** en grupos **quinona, cetonas conjugadas**, o también dobles enlaces de amida (la **banda I de amidas**).
- Hombros entre 1610–1590 cm^{-1} y 1510–1490 cm^{-1} : **dobles enlaces (conjugados)** en anillos aromáticos
- Banda entre 1470 y 1450 cm^{-1} : deformación de **uniones carbono-hidrógeno en grupos —CH₂— o —CH₃, alifáticos**.
- Hombro en 1400 a 1390 cm^{-1} : deformación de **hidroxilo** y de **carboxilo** y el *stretching* del **enlace C–O de aril-éteres** (por tanto de grupo fenol), el *stretching* o torsión antisimétrica de **grupos —COO—**, que pueden derivar de lignina.
- Banda a 1360 cm^{-1} : **enlaces —OH**, enlace **C–O en fenoles**, enlaces **C–O en grupos ácidos**
- Banda alrededor de 1330 cm^{-1} : grupos **siringilo** —uno de los componentes o derivados de las ligninas, las suberinas y los taninos—;
- Bandas entre 1110–980 cm^{-1} , solapadas con vibraciones de estructuras de tipo carbohidrato: grupos **vainillil y siringil**.

El **espectro tipo II**, de la **fracción ácidos fúlvicos**, con bajo peso molecular:

- Hombro entre 3400 a 3300 cm^{-1} : *stretching* de grupos **O–H en fenoles, alcoholes o ácidos**, y de uniones **N–H de aminas o amidas**.
- Hombro en la banda 3310 a 3290 cm^{-1} : enlaces de hidrógeno de grupos **–OH**.
- Hombro en la banda entre 1900 y 1500 cm^{-1} : **dobles enlaces**.
- Hombro entre 1730 y 1710 cm^{-1} : espectro tipo II de **ácidos fúlvicos**.

- Hombro de 1725 a 1500 cm^{-1} : *stretching* del doble enlace carbono-oxígeno en **grupos ácido, cetonas o aldehídos**.
- Banda centrada alrededor de 1640 cm^{-1} : dobles enlaces carbono-carbono conjugadas de estructuras aromáticas o de quinonas conjugadas.
- Banda de 1590 a 1520 cm^{-1} : amidas (*stretching* simétrico de grupos carboxilos o deformación de aminas, o *stretching* de la unión carbono-nitrógeno con doble enlace), la **banda de amidas III**, indicadora también de proteínas.
- Hombro de 1460 a 1450 cm^{-1} : uniones **C–H alifáticas**.
- Hombro en 1400 a 1390 cm^{-1} : grupo **fenol**, deformación de hidroxilo y de carboxilo, y el *stretching* de la **unión C–O de aril-éteres**.
- Hombro entre 1280 y 1200 cm^{-1} : *stretching* de **uniones C–O**, deformación del hidroxilo en grupos **ácidos, aril-éteres y fenoles**.
- Amplia banda a 1170-950 cm^{-1} podría corresponder a polisacáridos.

El **espectro tipo III**, obtenido a partir de la fracción ácidos húmicos: proteínas y carbohidratos:

- Hombro de 1660 a 1630 cm^{-1} : *stretching* de dobles enlaces C=O en **grupos quinona, cetonas conjugadas**, o también dobles enlaces en **amidás**
- Banda de 1550 a 1530 cm^{-1} : proteínas.

En la Tabla 4.6 se incluye la información recabada de varias fuentes respecto a las longitudes de onda correspondientes a diversos grupos.

A 1460 se manifiesta la presencia de quinonas, como parte de los productos del metabolismo microbiano durante la degradación del sustrato después del composteo (Tang y Katayama 2005). Se ha propuesto el llamado “perfil de quinonas” en el estudio de los cambios ocurridos en la comunidad microbiana durante el composteo: Q-9 de bacterias mesofílicas en la primera fase (degradadoras de hemicelulosa y celulosa), metaquinonas (de cadena larga, parcialmente saturadas) de hongos, algunas bacterias Gram-positivas, y actinobacterias, los cuales producen quinonas también al degradar lignina, en la fase termofílica (Yu *et al.* 2007).

Tabla 4.6 Frecuencias en los espectros IR de los principales grupos funcionales, en las sustancias húmicas de suelos *

Longitud de onda, cm-1	Grupos funcionales a los que corresponde
3400	O-H alcohol; y 1620 agua
2920	Tensión C-H alifático, lípidos (ligninas)
2600	2600 y 1725 torsión C=O; OH ácido
1740	1740 y 1720 ésteres (ceras, triglicéridos)
1725	C=O en RCHO aldehídos, y en carboxilos
1720	C=O de COOH, cetonas, no conjugadas aromáticas, derivadas de ligninas
1660-1630	Ligninas, torsión C=O amidas I, quinonas y/o H-cetonas conjugadas
1660	vibraciones C=C en anillos aromáticos
1650	Amidas
1600	Grupos aromáticos, olefinas, quinonas, carboxilos no conjugados
1590-1560	Hombro amidas II, tensión asimétrica carboxilos
1570, 1510	Vanillina, siringilo, <i>p</i> -hidroxibenzaldehído
1510	vibraciones C=C en anillos aromáticos
1460	C-H asimétrico de alquil-, o de O-CH ₃ en guayacil
1450	Deformación C-H de CH ₂ o CH ₃ (en tijera, <i>scissoring</i>)
1420	OH fenólico, deformación O-CH ₃ (Guayacilo, Siringilo) y R-O-aril éter
1400-1390	torsión C-O fenol, deformación OH y C-H de CH ₂ y CH ₃ , y tensión asimétrica COO-
1340	1340-1360 y 1540-60 amidas I, torsión simétrica C-H
1330	grupos siringil
1280	1280 a 1200 stretching en C-O y OH, en C-O de aril-éteres, deformación de COOH
1270	C-O Metilo en anillos de guayacil
1260	C-O-C éteres, C-O-CH ₃ en guayacil
1230	OH del COOH en grupos <i>p</i> -hidroxibencilo; deformación del C-OH fenólico
1220	banda tensión de ésteres y fenoles (ácidos fúlvicos)
1130	torsión de C-O en carbohidrato
1120-950	torsión en C-O de polisacáridos o sustancia semejante, o alcoholes; Si-O de impurezas silicatos
1050	(en AH) metoxilos carbohidratos, silanoles filosilicatos
1040	Vibración O-CH ₃ en vainillina o siringil
1030	(en AH) metoxilos de lignina; torsión de C-O y C-H, baja polaridad arcilla o carbohidratos
870	Torsión CH aromático fuera de plano
840	Grupos <i>p</i> -hidroxibencilo, anillos aromáticos sustituidos
Relación 2920/1510	Alifaticidad

* Stevenson 1994, Kalembasa *et al.* 1994, Senesi *et al.* 1989, Dorado *et al.* 2001, Fernandez-Getino *et al.* 2010.

4.6.4 - Análisis de las fracciones húmicas mediante espectrofotometría de luz visible (vis, absorbancia dentro del rango de 700 a 400 nm; método de Kononova y Bel'chikova 1960).

Cada uno de los materiales utilizados y obtenidos en el desarrollo de los experimentos fue sometido a extracción con solución Kononova (de acuerdo con García 2001, y Kononova 1982) siguiendo los procedimientos del recuadro:

Fracciones húmicas mediante espectrofotometría de luz visible (vis 700 a 400 nm; Kononova y Bel'chikova 1960).

- 1) Se pesan los gramos de suelo necesarios para obtener una relación 1/400 de suelo/extractante (Kumada, 1988), y 400 cm³ de solución extractora de Kononova (ver 4.6.1 paso 2), se agita 24 horas,
- 2) se separa el sobrenadante para centrifugarlo a 3.500 rpm durante 20 minutos;
- 3) se desecha el precipitado, se agrega H₂SO₄ (1:1) hasta pH 1.5 para precipitar los AH, y se deja que floculen durante la noche.
- 4) Al día siguiente se sifona el sobrenadante con los AF; el resto se centrifuga a 3000 rpm durante 10 minutos, se lava dos veces con agua destilada (desechando el líquido) y se redissuelve añadiendo NaOH hasta un pH de 12;
- 5) Se centrifuga a 12,000 rpm durante 15 minutos para sedimentar las arcillas dispersas.
- 6) Se decanta el sobrenadante con los AH, se precipita una vez más con H₂SO₄ (1:1) a pH 1.5,
- 7) se deja que flocule durante la noche, y al día siguiente se centrifuga a 3000 rpm durante 10 minutos;
- 8) los AH se lavan con agua destilada dos veces y se colocan en un tubo de diálisis 6000 D, y se dializan para eliminar los iones (cambiando el agua destilada exterior durante 3 veces en 48 horas).
- 9) Los AH dializados se diluyen a 125 cm³, con NaHCO₃ 0.02 M;
- 10) de esta solución se toman alícuotas por duplicado (10 cm³) en matraz Erlenmeyer de 125 cm³ y se secan en baño maría, para determinar el carbono (Walkley y Black).
- 11) Con base en el contenido de carbono de la solución se calculan los cm³ necesarios para obtener una concentración de 0.136 g de C por dm³; la alícuota correspondiente se afora a 100 cm³ con NaHCO₃ 0.02 M y se deja en reposo por 4 días en que el pH se estabilizará cercano a 7.

La solución se coloca en una cubeta de cuarzo para determinar las densidades ópticas de la solución de humato sódico (y de un blanco con sólo NaHCO₃ 0.02 M) a 726, 665, 619, 574, 533, 486, 465 y 450 nm, en el espectrofotómetro PyE Unicam.

A partir de las lecturas en el espectro de luz visible, para determinar su aromaticidad (Traina et al. 1990) se obtuvo también la relación (conocida como E4/E6) entre las densidades ópticas a 465 (E4) y a 665 nm (E6), que informa acerca del tamaño molecular o a la polidispersión de los AH (Chen et al. 1977).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 - Ambiente de las lombrices colectadas para lombricomposteo.

Descripción del sitio donde se colectaron.



Fig. 5.1 – Cacaotal del Sr. Genárez frente al CRT Puyacatengo, Teapa

5.1.1 — Ubicación y clima.- El cacaotal al pie del Cerro Madrigal (frente al Centro Regional Tropical Puyacatengo del Colegio de Postgraduados Chapingo) en el Municipio de Teapa, se ubica a 17° 13.7' N, 92° 55.6' W, a 30 m del río Puyacatengo. Su clima está caracterizado como Af(m) cálido húmedo con lluvias todo el año y lluvia invernal menor al 18% (INEGI 1986); la temperatura media anual es de 22.8 °C, máxima en junio con 43 a 45 °C, mínima en diciembre con 18 a 21 °C. La precipitación pluvial es de 3862.6 mm, máxima en septiembre con 569.7 mm, mínima en abril con 167.8 mm (CRTP 1994).

5.1.2 – Descripción del suelo.

El material parental es un depósito coluvio-aluvial, a partir de roca caliza del Cretácico; la pedregosidad es de 5%, poco visible. Presenta una pendiente de 4° 30' con dirección 25° E del N. La pendiente, compuesta, baja hacia la falda del

cerro, y sube hacia a la orilla del río. El material parental en los suelos de este piedemonte puede estar presente en las arenas de los horizontes superficiales, aunque por la pendiente compuesta resulta claro que hay aporte de material depositado por el río.

La forma del terreno es convexa, pero el terreno es inundable y con muy buena agregación. Según el propietario, había fuerte erosión hasta que ocurrió la erupción del Chichonal (en 1982), que cubrió el suelo con cenizas. El suelo está ocupado por un plantío de *Theobroma cacao* L.

Tabla 5.1 – Resultados de la morfología del perfil bajo el cacaotal y de las pruebas de campo

Horizontes	Límites cm	Color húmedo	Color seco	Carbonatos, reacción al HCl*	MO, reacción al H ₂ O ₂ *	Alofanos (Fieldes y Perrot)	pH papel indicador
Ahp	0 a 15	10 YR 4/3	10 YR 4/4	0	XX	Trazas	5
A	15 a 30	10 YR 4/4	10 YR 4/4	0	X	Trazas	6
AB	30 a 40	10 YR 4/4	10 YR 5/4	0	X	Trazas	6
B1	40 a 65	10 YR 5/4	10 YR 4/4	0	X	Trazas	5
B2t	65 a 71	10 YR 4/4	10 YR 5/4	0	X	Trazas	5
C	71 a 129	Roca intemperizada	Roca intemperizada	0	0	0	5

*semi-cuantitativo: 0 reacción nula , X apenas visible, XX visible

Horizonte A_{hp}, 0 a 15 cm principalmente hojarasca y restos de las plantas de cacao; algunos agregados subredondeados de 2.5 cm, desarrollo débil (se deshacen al apretarlos entre dos dedos).

Horizonte A, 15 a 30 cm: estructura en bloques subangulares; su textura al tacto se define porque se adhiere a los dedos y manos pero puede formarse bola y cordón, migajón limo-arcilloso. Presencia de lombrices en los horizontes

superficiales. El color visible en campo es gris claro. Poros abundantes menores a 1 mm, con cutanes color pardo claro muy delgados. La punta del cuchillo penetra fácilmente.

Horizonte AB, 30 a 40 cm: estructura en bloques subangulares; se adhiere a los dedos y manos, pero aún pueden formarse bola y cordón, migajón limo-arcilloso. El color visible es también gris claro, y los poros menores a 1 mm abundantes. La punta del cuchillo penetra con más dificultad.

Horizonte B₁, 40–65 cm, textura migajón arcillo-limosa, estructura en bloques subangulares (diámetro de bloques 4 cm).

Horizonte B₂, 65–71 cm, textura migajón arcillo-limosa, estructura en bloques angulares. Bajo los 71 cm presenta roca caliza intemperizada con forma esferoidal, fragmentos mayores a 15 cm, entre los cuales hay partículas finas (principalmente arenas).

Tabla 5.2 –Resultados de los análisis de laboratorio, perfil bajo el cacaotal.

Horizonte	Límite	D A	D R	Textura (g·kg ⁻¹)			Tipo	COT g·kg ⁻¹	CIC cmol ₍₊₎ · kg ⁻¹	pH (1:2.5) suelo	
				g·cm ⁻³	Are- na	Limo				Arci- lla	H ₂ O
Ah	0 a 15	0.96	2.07	491	418	91	Franco	49.0	17.6	5.7	5.0
A	15 a 30	1.02	2.23	491	382	127	Franco	23.6	20.6	5.6	4.6
AB	30 a 40	1.05	2.26	454	382	164	Franco	26.3	22.0	5.6	4.3
B1	40 a 65	1.08	2.24	454	364	182	Franco	21.8	19.6	5.4	4.1
B2t	65 a 71	1.10	2.29	295	423	282	Franco arci- lloso	19.9	18.4	5.2	4.2
C*	71 a 129	1.13	2.36	773	145	82	Arena miga- josa	14.5	16.2	5.2	4.2

DA: densidad aparente, DR: densidad real.

* horizonte C, datos referentes al suelo fino introducido entre la roca intemperizada.

El material parental es roca caliza, presente en este piedemonte como arenas en los horizontes superficiales (materiales no consolidados, fuertemente intemperizados y lavados, de textura fina; presentan efervescencia al HCl). Situado en pendiente sometida a erosión y aporte. Ambiente: la región se encuentra bajo la influencia de clima tropical lluvioso.

Desde la superficie y hacia la profundidad, en los horizontes A, AB, B1 y B2t, los porcentajes de arcilla (crecientes) y la DA (también creciente) indican que la arcilla es translocada desde el horizonte superficial a los horizontes subyacentes, y puede considerarse horizonte de acumulación al denominado B2, cuyo contenido de arcilla es mayor al del horizonte B1 en más de 1/3, y puede reconocerse como horizonte de acumulación árgico a profundidad somera (menos de 1 m).

5.1.3 – Clasificación del suelo de acuerdo con la WRBSR, y con la Soil Taxonomy. La clasificación que se propone para este suelo es la siguiente:

conforme a la WRBSR (FAO 2001) puede calificar como LUVISOL pues presenta un horizonte de iluviación árgico formado por translocación de arcilla desde la superficie hasta el contacto con la roca intemperizada, arcilla dispersa por el agua que percola en esta región muy lluviosa; pero la arcilla puede dispersarse porque el pH es cercano a 7 (uno de los requisitos de la WRBSR, FAO 2001), para lo cual la roca caliza del Cerro Madrigal, intemperizada y disuelta, aportaría cationes divalentes. Pero la ausencia de carbonatos según la reacción al HCl y considerando la pluviosidad se deduce una “baja concentración de iones divalentes” (requisito según la WRBSR), además de la dispersión debida a la presencia de materia orgánica generada bajo el cacaotal (que “puede presentar polifenoles” derivados de la hojarasca: corteza, ramas, hojas, frutos caídos ya que no se cosecha el cacao). La WRBSR (FAO, 2001) señala, además, que los Luvisoles presentan arcillas con elevada actividad y por tanto una CIC igual o mayor a $24 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$, mientras que en el suelo examinado la CIC apenas alcanza $22 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$; y que los Luvisoles son suelos sometidos a intemperización

moderada, condición incompatible con las elevadas temperaturas y abundantes lluvias de esta región.

Puede también proponerse como LIXISOL (de acuerdo con la WRBSR-FAO 2001): suelo intemperizado en el cual la arcilla eluvial ha sido translocada hacia un horizonte árgico subsuperficial que presenta cantidades importantes de arcillas de baja actividad y un porcentaje de saturación de bases moderado a alto. Con un perfil ABtC dentro de los 100 cm a partir de la superficie del suelo, fuertemente intemperizado, cuyo horizonte árgico (el B2, ver Tabla 8.2), tiene 1.5 veces más arcilla que el horizonte suprayacente, en menos de 30 cm; el B1 con 25 cm (de 40 a 65 cm de profundidad) frente al B2 con sólo 6 cm (de 65 a 71 cm de profundidad); no presenta estructura de roca o trozos de ésta en más de la mitad del volumen del horizonte B, que sí está presente en el C. Entre las características morfológicas se señala (FAO 2001) que la mayoría de los Lixisoles tienen un horizonte superficial delgado, pardo, *ócrico* sobre un horizonte árgico que con frecuencia carece de una evidencia clara de la iluviación de arcilla excepto un incremento fuerte en el contenido de arcilla en una distancia vertical pequeña. El horizonte árgico presenta estructura más fuerte que la observada en Acrisoles, y una saturación de bases mayor (manifiesta aquí como pH cercano al neutro, en vez de ácido). La mayoría de los Lixisoles (FAO 2001) presentan drenaje libre y carecen de evidencias de saturación. Dado que tiene más de 1% de COT hasta una profundidad de 50 cm, puede calificarse como *húmico*. Sin embargo, la capacidad de cambio es mayor a $16 \text{ cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en todo el perfil, contra la “baja capacidad de cambio” que señala FAO (2001).

Por otro lado, siguiendo las Claves para la Taxonomía de Suelos (SMCS 1995) se propone: régimen de humedad údico, régimen térmico hipertérmico; con un horizonte argílico o kándico, el epipedión tiene un tamaño de partículas arenosa o arenosa-esquelética en todo su espesor... hasta el contacto lítico o paralítico o petroférico, como Ultisol; Inceptic Hapludults. (Ver apéndice 8c).

5.2 – Composteo. La cascarilla como sustrato.

La pérdida en peso de la cascarilla al secar 2 g fue 1.53 g, es decir 76.5% de humedad. Al incinerar 2.0 g las cenizas pesaron 0.12 gramos, y tomando 0.47 g como peso seco base, 0.12 g de cenizas son 23.5 % o $235 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. El porcentaje de fibra cruda se calcula como la diferencia “materia seca menos cenizas ($0.47 \text{ g} - 0.12 \text{ g} = 0.35 \text{ g}$) dividida por el peso inicial de cascarilla y multiplicada por 100:

$$(0.35 \text{ g} / 2 \text{ g}) \times 100 = 17.5 \% = 175 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$$

La determinación de grasas resultó en 5.06%, $50.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

La proporción de materia orgánica se puede estimar restando al porcentaje de grasas y materia seca el porcentaje de cenizas:

$$\%MO = (\% \text{grasa} + \% \text{fibra cruda}) - \% \text{de cenizas} = (5.06 \% + 17.5 \%) - 6.0\% = 11.6\%$$

De acuerdo con datos de Minifie (1989), sumando el peso molecular de los distintos componentes, 2061, y sumando el peso del carbono en esos componentes se estimaría en 59.4% el carbono; Abbiola y Tewe (1991) determinaron el carbono contenido en la cascarilla de distintas variedades, cuyo promedio sería de 14.8 % ($1.1\% \text{ extracto éter} + 43.9\% \text{ fibra cruda} - 15.3\% \text{ cenizas} = 29.7 \%$, dividida entre 2 de acuerdo con Van Reewijk 1995). El contenido de COT fue 54.6 % ($546 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), cercano al estimado a partir de los componentes, muy elevado respecto al promedio de las distintas variedades.

El contenido de nitrógeno fue de $51.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, muy elevado frente a los $24.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ en promedio reportados en literatura (v. tabla 3.2). Esta cascarilla presenta más cenizas, menos fibra cruda, contenido elevado de grasas, más bajos COT y nitrógeno que otras.

5.3 – Composteo en pila: desarrollo.

El composteo se desarrolló en pila, durante 3 ocasiones: marzo y junio de 2002, y febrero de 2003 (Figura 5.2, Tabla 5.3).

Durante el desarrollo de la primera pila, en marzo de 2002, se observaron cambios drásticos en poco tiempo: en el centro de la pila aumentó la temperatura

desde 29 °C a la decimocuarta hora hasta 58 °C a la hora 30, cuando se agregó agua por primera vez, y en ese momento la temperatura apenas descendió dos grados para volver a ascender llegando a 61 °C a la hora 56.

Durante el composteo en pila por segunda ocasión, en junio de 2002, el aumento fuerte en la temperatura se produjo hacia la vigésima hora, iniciando en el centro (29 a 38 °C) y el vértice (29 a 37 y a 47 °C), y extendiéndose rápidamente al conjunto de la pila.

En la pila desarrollada durante la tercera ocasión, en febrero de 2003, el ascenso de temperatura se presentó más pronto, hacia la décimosexta hora, con un rango mas amplio en la cúspide (27 a 40 °C hacia la hora 26) paralelo a un menor incremento de temperatura en el interior (27 a 36 °C) y a un pequeño incremento en la base (4 grados, 26 a 30 °C), pero oscila alrededor de los 52 °C desde la hora 36 hasta la 92, que corresponderían a la fase de degradación de carbohidratos.

Tabla 5.3 – parámetros del composteo de las pilas: temperatura máxima alcanzada.

Pila número	Fecha	T máxima 1 ^a fase termófila	Tiempo, h	T máxima 2 ^a fase termófila	Tiempo transcurrido hasta la T máxima, h	Tiempo total de composteo horas
1	Marzo 2002	58 °C	30	63 °C	208, 216, 218	624
2	Junio 2002	60 °C	80	68 °C	162	262
3	Febrero 2003	62 °C	106	65 °C	160	664

En junio, a cada volteo correspondió un descenso y un máximo en la temperatura: tras el primer volteo el descenso fue de 55 °C a 47 °C al voltear, y el ascenso, en 2 horas, a 61 °C; al segundo volteo hubo descenso y ascenso más lentos, descenso de 56 a 47 °C en dos horas, ascenso a 59 °C en 6 horas más; tras el tercer volteo la temperatura descendió alrededor de 10 °C en una hora (de 58 a 48 grados) y ascendió 16 °C en 12 horas más (a 64 °C), etcétera (Tabla 5.3).

En junio la pila estaba cubierta al 100% por micelio a las 42 horas, y esta condición varió con el volteo de la pila. El pH fue ácido (entre 4 y 5) durante las primeras horas, ascendiendo gradualmente: pH 5.0 a las 46 horas, pH 7.0 a las 76 h. Hacia el vigésimoprimer día se observó el sustrato muy oscurecido y con poca variación térmica, con olor a “tierra” apenas notable, sin insectos ni larvas, y su color era castaño muy oscuro: después de voltear y aplicar humedad, la elevación de la temperatura era menor a 4 °C. La composta se consideró madura entonces, de acuerdo con Mustin (1987), y se suspendió la adición de agua para detener las reacciones.



Fig. 5.2 – Pila de composteo de cascarilla de cacao en A. Canabal, Centro, Tabasco.

En febrero apenas hubo ligeros descensos en la temperatura al agregar agua (4 °C la primera vez, dos o tres grados las subsecuentes). Se observó micelio en la superficie de la pila a la hora 14, ausente a la siguiente hora y aparece nuevamente hasta la hora 25. El pH, medido con papel indicador, fue 6 en todas las ocasiones.

La composta obtenida de la pila de 50 kg de cascarilla presentó al final un peso de 33.8 kg, con un rendimiento de 67.7%.

Durante las tres ocasiones se desarrolló el composteo en pila hasta que la temperatura en aquella descendió y mostró poco cambio durante varios días: hacia los 26 días, o al menos hacia los 20 días. En la Tabla 5.3 se presentan las temperaturas máximas alcanzadas y el tiempo en el cual se presentaron.

En resumen, en el proceso de composteo de cascarilla de cacao en pila la temperatura máxima llega a 63–68 °C y se alcanza alrededor de las 160 horas. La madurez, definida por las condiciones en las cuales la temperatura ya casi no cambia al humedecer la pila, por la melanización del material y porque ya no presenta olor, se alcanza antes de 15 días, lapso corto si se consideran los reportes respecto a madurez en compostas encontrados en literatura: 2 a 12 meses en pilas que se vuelcan (Thomson *et al.* 2002).

En los procesos de composteo en pila desarrollados, los tiempos fueron cortos: 19 días en junio (10 días con las temperaturas mayores a 40 °C), 28 días en febrero (13 días la fase termofílica). La fase termofílica corresponde a la degradación de sustratos resistentes como ligninas por hongos y actinobacterias (Yu *et al.* 2007); la proporción de horas durante las cuales la temperatura fue mayor a 40 °C fue 0.53 en junio, 0.41 en febrero: la descomposición microbiana y la inercia térmica dentro de las pilas fueron favorecidas por la elevada temperatura ambiente en verano (junio), y señalan también que las temperaturas elevadas en esta región favorecen un composteo más rápido.

Tabla 5.4 - Resultados de los análisis de la cascarilla y de la composta

Material orgánico	Cenizas, g·kg ⁻¹	D A* g·cm ⁻³	COT** g·kg ⁻¹	Carbono extraíble, g·kg ⁻¹	N*** g·kg ⁻¹	C/N	Fibra cruda g·kg ⁻¹	Grasas g·kg ⁻¹
Cascari-lla Cruda	60	0.27	546.0	14.8	51.5	10.60	12.5	5.1
Compos-ta	87	0.34	443.0	6.64	89.0	4.98	9.76	0.2

* densidad aparente

** carbono oxidable total

*** nitrógeno total

5.4 – Cambios ocasionados por el composteo.

En la Tabla 5.4 se presentan las características de la cascarilla y de la composta. La densidad aparente es mayor en la composta, en la cual el carbono orgánico total es menor (proporción 0.8) mientras que el carbono extraíble es mucho menor (proporción 0.45), el porcentaje de nitrógeno es mayor (proporción 1.7), y la relación C/N es también mayor, posiblemente por los productos microbianos que quedan en la composta (Haider *et al.* 1975). Estas diferencias son producidas por los procesos que tienen lugar durante el composteo, principalmente compactación; indican humificación si la mayor densidad está asociada a la incorporación de oxígeno (por la formación de grupos carboxilo, etc.), y si la mayor proporción de enlaces dobles se debe a la presencia de grupos fenólicos y quinónicos (Haider *et al.* 1975).

5.4.1 – Fracciones de la materia orgánica de las enmiendas. La composta de cascarilla presenta las proporciones más elevadas del carbono en la fracción correspondiente a huminas (resultados del método Dabin, Tabla 8.5, figura 8.3), debido a su insolubilidad en los extractantes (ácido fosfórico, pirofosfato de sodio, hidróxido de sodio), y también son resistentes a la degradación microbiana: celulosa, hemicelulosa, complejos fenol-proteína, lignina, etc. (Paul y Clark 1996; Fan *et al.* 2006); además de melaninas de los hongos desarrollados durante el composteo, y parafinas (Stevenson 1994).

Tabla 5.5 – Distribución del carbono orgánico titulable de los extractos de la cascarilla y de la composta (método Dabin), en g·kg⁻¹

Material orgánico	COT	C Extraíble con H ₃ PO ₄ 2M	C _{MOL} materia orgánica libre	C _{AF} extraí- bles	C _{AH}	C Huminas Totales	Eficiencia extracción (%: fracc. X 100 / COT)	Relación AH / AF
Casca- rilla tostada	54.6	4.95	40.05	0.20*	12.24*	2.11*	14.55	61.20
Com- posta	44.3	3.51	17.8	4.99*	11.70*	9.80*	26.49	2.34

*valores correspondientes a los extractos.

Los resultados obtenidos mediante la extracción de los compuestos orgánicos de la composta por el **método de Kononova** fueron: COT 23.8 g/100 g de material, de los cuales resultaron extraíbles como carbono de AH (C_{AH}) 0.538 g (0.0157 %); como carbono de AF (C_{AF}) 0.472 g (0.0138 %); y sustancias coloreadas adsorbidas en PVP 0.374 g (0.0109 %). El extracto de la composta por la técnica de Kononova muestra mayor proporción de carbono en la fracción ácidos húmicos que en la correspondiente a ácidos fúlvicos, de manera inversa a los resultados de la técnica de Dabin, explicable si en estos materiales la acidificación resulta más eficiente para obtener extractos de algunas fracciones de la materia orgánica. Se puede esperar que las fracciones de estos extractos apenas serán detectables en las fracciones húmicas de los suelos a los cuales se agregaron como enmienda la cascarilla o la composta.

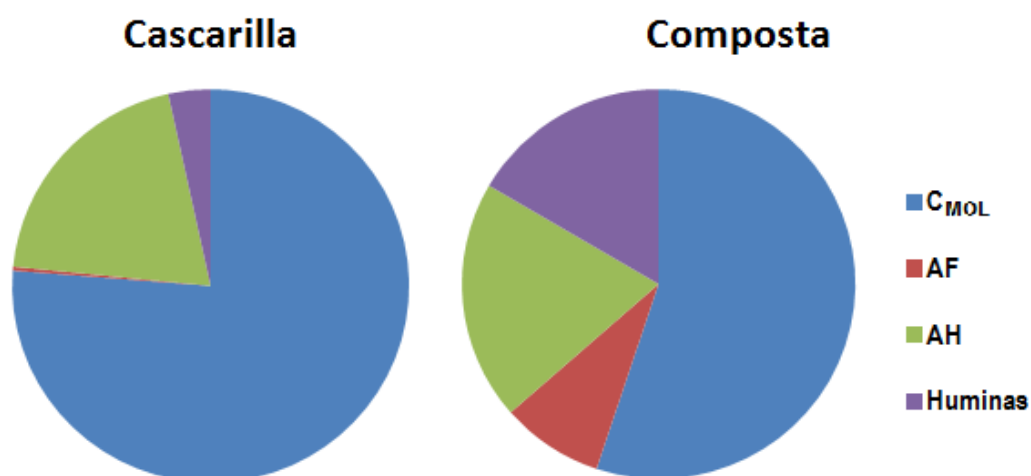


Fig. 5.3 – Fracciones del C –método de Dabin– en la cascarilla y en la composta.

5.4.2 – Espectroscopía vis-UV. Al examinar los extractos de ácidos húmicos de la cascarilla y de la composta en el espectro visible, se encuentran los valores presentados en la Tabla 5.6 y en la Figura 5.4.

Son mayores los valores para la composta en la densidad óptica específica E4, cuyo aumento ocurre en función del avance de humificación y con el grado de aromaticidad de las moléculas, y en la relación E4/E6, y la gráfica trazada con los datos tiene también una pendiente más pronunciada, lo cual correspondería

(Chen *et al.* 1977) a un peso molecular más bajo en los componentes del extracto de la composta frente a los del extracto de la cascarilla, así como a una mayor proporción de oxígeno, y a una menor proporción de carbono en la composta; el composteo resulta en la formación de compuestos más simples y más oxidados.

Tabla 5.6 – Valores de absorbancia (unidades de absorción) en el espectro visible-UV, de los extractos alcalinos de cascarilla y composta

nm	420	465	486	530	574	619	665	726	Relación E4/E6
Casca- rilla	0.148	0.122	0.116	0.101	0.093	0.084	0.080	0.083	1.525
Com- posta	0.193	0.141	0.128	0.105	0.093	0.085	0.079	0.078	1.785

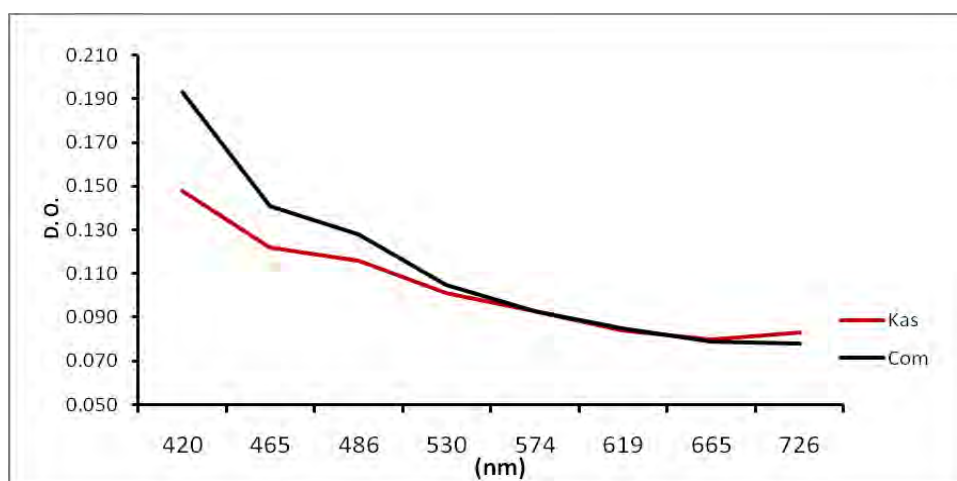


Fig. 5.4 – Curvas del espectro visible-UV de los extractos alcalinos

(Kas= cascarilla, Com= composta)

A partir de las lecturas en el espectro de luz visible se obtuvo también la relación entre las densidades ópticas a 465 nm (E4), y a 665 nm (E6), definida como relación E4/E6 (Chen *et al.* 1977), y que se asocia con la polidispersidad de los AH (Dorado *et al.* 2003). Al comparar los valores obtenidos en la relación E4/E6 con los presentados por Kononova (1982) y partiendo del hecho de que no precipitaron al tratarlos con CaCl_2 (comportamiento también señalado por Kononova), se puede definir que su comportamiento es de ácidos fúlvicos.

5.4.3 Espectroscopía de FT-IR.

La interpretación de los espectros de FT-IR de los AH se basa en las bandas de absorción señaladas en el capítulo 4.6.3 y la Tabla 4.6.

Los espectros IR, en el rango 4000 a 800 cm^{-1} (Figura 5.5) muestran que la cascarilla contiene proteína (espectro tipo III, hombros a 1660–1630 y a 1550–1530), y apreciable proporción de componentes alifáticos (bandas a 2920 y a 1460). En cambio, la composta de cascarilla (Com) presentó contenidos más bajos en todos los grupos funcionales (ácidos, fenoles) excepto en la banda de 1660 a 1630 cm^{-1} , que puede corresponder a ligninas, quinonas, o a amidas. Son también notables hombros, en la banda de 1590 a 1560, alrededor de 2920 y alrededor de 1030, que indican la presencia, tras el composteo, de grupos derivados de lignina.

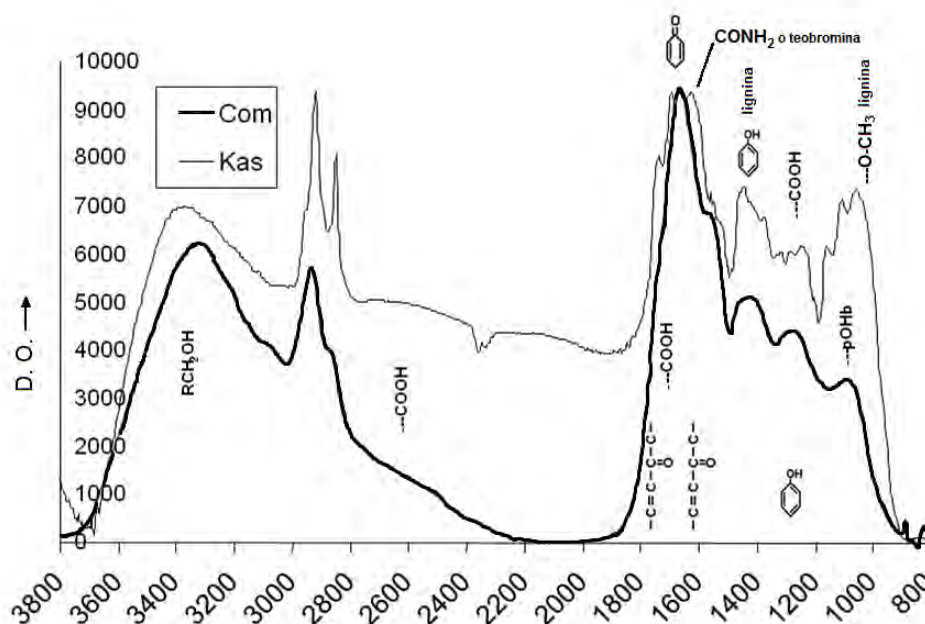


Fig. 5.5 – espectros IR de la cascarilla y la composta (fracción AH)

Com = composta, Kas = cascarilla

Frente al espectro de la fracción ácidos húmicos de la cascarilla como material compostado, el de la composta –como producto– no presenta una mayor proporción de grupos carboxilo que pudiesen ser resultado de oxidación y

apertura del anillo en grupos fenol de la lignina, así que la oxidación de grupos fenol no es un proceso dominante en este composteo.

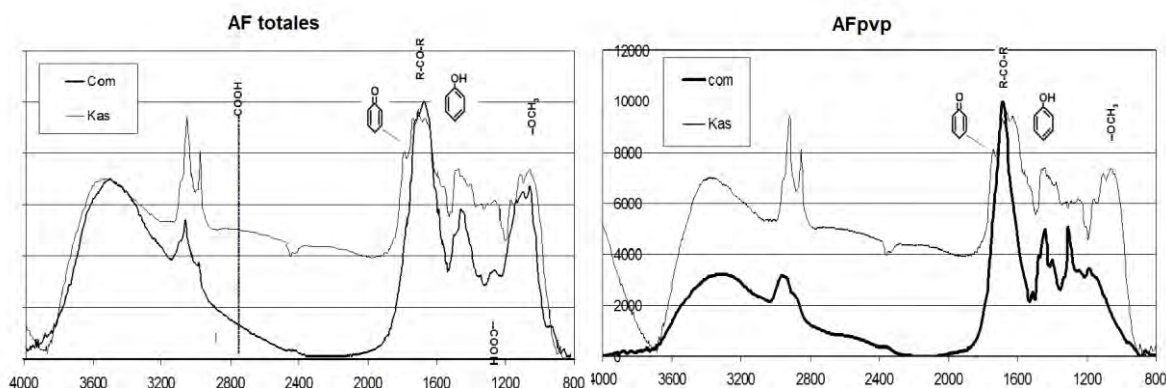


Fig. 5.6 – espectros IR de la cascarilla (Kas) e IR de la composta (Com), fracción “ácidos fúlvicos” AF totales, y fracción adsorbida en polivinilpirrolidona AFpvp.

La banda a 1590-1560 corresponde a tensión asimétrica de carboxilos y a la “banda amidas II”. La composta contiene menor cantidad de amidas. La banda es más notable en el espectro de los ácidos fúlvicos, probablemente por su contenido de proteína microbiana durante el composteo. De acuerdo con Yu *et al.* (2007) la presencia de quinonas en la composta se debe sobre todo a la actividad microbiana, puede corresponder a las lignoproteínas persistentes y a la proteína fúngica o microbiana (Alemawor *et al.* 2009), ya que la incorporación de proteína microbiana es también un proceso asociado al composteo.

Los espectros correspondientes a la fracción de ácidos fúlvicos totales (Fig. 8.6) muestran, respecto a la cascarilla y a la composta, un hombro semejante en la región 3400 a 3300 correspondiente a fenoles y amidas, una banda de 1725 a 1500 correspondiente a grupos ácido, cetonas, aldehídos, y también entre 1170 y 950 presencia probable de polisacáridos. Los espectros de sustancias húmicas coloreadas (adsorbidas en polivinilpirrolidona) confirman la presencia de quinonas (Fig. 8.6) o amidas tanto en la composta como en la cascarilla.

Respecto al índice de aromaticidad (Tabla 5.7), el valor más alto lo presentó la cascarilla, seguida por la composta, lo cual es resultado de la condición alifática de dichos materiales (a 2920 cm^{-1} se manifiestan los enlaces C–H alifáticos).

Tabla 5.7 - Valores (promedio) de la absorbancia (UA×10⁴) por grupos significativos en los espectros IR de la fracción ácidos húmicos, para los índices: aromaticidad, siringil/guayacil.

Frecuencia, grupos que se manifiestan	Cascarilla	Composta
1725 a 1720 cm ⁻¹ grupos C=O del COOH	8315	6807
1720 cm ⁻¹ –C=O, –C=C–, carboxilos	8392	6946
1510 cm ⁻¹ (referencia aromaticidad)	6745	4702
1280 a 1200 cm ⁻¹ –COOH	6466	4019
2920/1510. Aromaticidad	1.496	1.114
1720/1510 aumento en grupos funcionales ácidos de las moléculas húmicas	1.083	1.381
1330/1270 siringil/guayacil	0.998	0.944

Las sustancias coloreadas que quedan después de extraer los ácidos húmicos pueden ser ácidos fúlvicos (Stevenson y Elliot 1989), ácidos húmicos unidos a las arcillas y material húmico poco soluble en álcali; aparecen como parte de la fracción de huminas las melaninas de los hongos, estructuras parafínicas y material vegetal que no ha sido biodegradado (Hatcher *et al.* 1985) incluyendo a las ligninas (Wu *et al.* 2005). La composta incluye esos restos resistentes a la degradación, parafinas de la cascarilla y melaninas de los hongos participantes en el proceso. Sin embargo, puede tomarse como indicio del proceso de humificación (Haider *et al.* 1975).

5.5 – Efectos del extracto acuoso de cascarilla sobre maíz.

El extracto acuoso de cascarilla se aplicó como ensayo para aproximarnos a un uso alternativo de la cascarilla, distinto al composteo, y sólo se realizaron algunos experimentos sembrando maíz en maceta y regándolo con soluciones de dicho extracto en distintas concentraciones. En el primer experimento (Figura 8.7). germinaron 59 de las 60 semillas, el 98 %, a los 11 días. Los resultados en crecimiento, número de hojas y de mazorcas, a los 64 días, se presentan en la Tabla 5.8.

Las mazorcas medían de 5 a 7 cm de largo y poco más de 1 cm de diámetro. Las macetas fueron invadidas por hormigas (*Hypoponera* sp., Fernández 2003) y las mazorcas no crecieron más de 10 cm.

Considerando como un resultado del tratamiento el que las plantas no se desarrollaran o se marchitaran, aquellas regadas con extracto 60% sobrevivieron alcanzando la mayor altura, el mayor número de hojas y de mazorcas, y la menor variación en esas tres características. Los promedios son 44.1 cm de altura, 10.2 hojas, 1.2 mazorcas por planta, y la DS indica variación relativamente baja.



Fig. 5.7 – Maíz en macetas, tratado con extracto de cascarilla

Tabla 5.8 – Desarrollo del maíz en macetas tratadas con distintas concentraciones de extracto de cascarilla

Extracto, dilución (%)	Altura de la planta en cm *	Hojas funcionales *	Mazorcas / planta *
0	32 ± 8.9	10.4 ± 1.8	0.8 ± 0.83
20	30.3 ± 18.7	8.0 ± 4.5	0.8 ± 0.45
40	25.4 ± 11,1	6.4 ± 3.6	0.4 ± 0.55
60	44.1 ± 10.3	10.2 ± 1.3	1.2 ± 0.45
80	33.7 ± 14.6	8.0 ± 2.7	0.6 ± 0.56
100	27.4 ± 29.4	3.8 ± 3.5	0.2 ± 0.45

*media ± desviación standard. $P = 0.65$

El segundo lugar en número de hojas y en mazorcas corresponde al testigo, plantas a las cuales no se agregó extracto de cascarilla: 32 cm de altura, 10.4 hojas y 0.8 mazorcas por planta, dos parámetros que indican una mayor producción. La variación en altura y en número de hojas fue la menor, aunque las plantas variaron mucho en la producción de mazorcas (fructificación).

En tercer lugar, las plantas tratadas con 20% de extracto produjeron también 0.8 mazorcas en promedio, presentando mayor consistencia o menor DS a pesar de que alcanzaron menor altura y menor número de hojas. Una dosis relativamente baja de extracto de cascarilla puede incrementar la producción de semilla.

Las plantas tratadas con 80% de extracto de cascarilla presentaron el segundo lugar en altura de las plantas, pero cuarto lugar en rendimiento y en número de hojas, indicando un desarrollo con deficiencias nutricionales (Tanaka y Yamaguchi 1984). Los más bajos resultados se obtuvieron con extracto 100%: la altura de las plantas es menor, varía tres veces más que sin extracto, el número de hojas apenas llega a cuatro, y sólo una quinta parte de las plantas desarrollaron mazorca. El extracto de 10 g de cascarilla por dm^3 de agua resulta desfavorable para el desarrollo de plantas de maíz.

El experimento indica que **el extracto hidrosoluble de cascarilla** (10 g por litro de agua, diluído al 60 %) utilizado para regar maíz, **puede incrementar el rendimiento en semilla.**

En otro experimento con extracto 50% y 25%, las plantas tratadas con 50% de extracto alcanzaron en promedio 79.2 cm, 4.3 hojas por planta y produjeron 0.57 mazorcas en promedio. Las plantas tratadas con 25% de extracto alcanzaron 69.8 cm, presentando 0.71 mazorcas y 3.5 hojas por planta, en promedio. Las plantas testigo alcanzaron en promedio la menor altura, 61.2 cm, pero produjeron 0.57 mazorcas por planta también, y 4.27 hojas por planta. El rendimiento fue mayor con extracto hidrosoluble de cascarilla al 25%. La varianza (calculada respecto a los datos de altura de planta) resultó menor bajo el tratamiento con 25% de extracto (4.28), seguida por el tratamiento con 50% de extracto (4.75), y la

mayor variabilidad se presentó en el lote testigo (varianza = 6.09). Los resultados parecen indicar que 25% de extracto de cascarilla en la solución con que se riega, da lugar al aumento en la producción de mazorcas en las plantas.

Las plantas regadas con extracto de cascarilla presentaron pigmentación rojiza en las hojas y la parte superior del tallo. Durante ambos experimentos las mazorcas no crecieron más de 10 centímetros, y en el segundo experimento las plantas comenzaron a marchitarse rápidamente después de 105 días, lo cual señala algún efecto desfavorable.

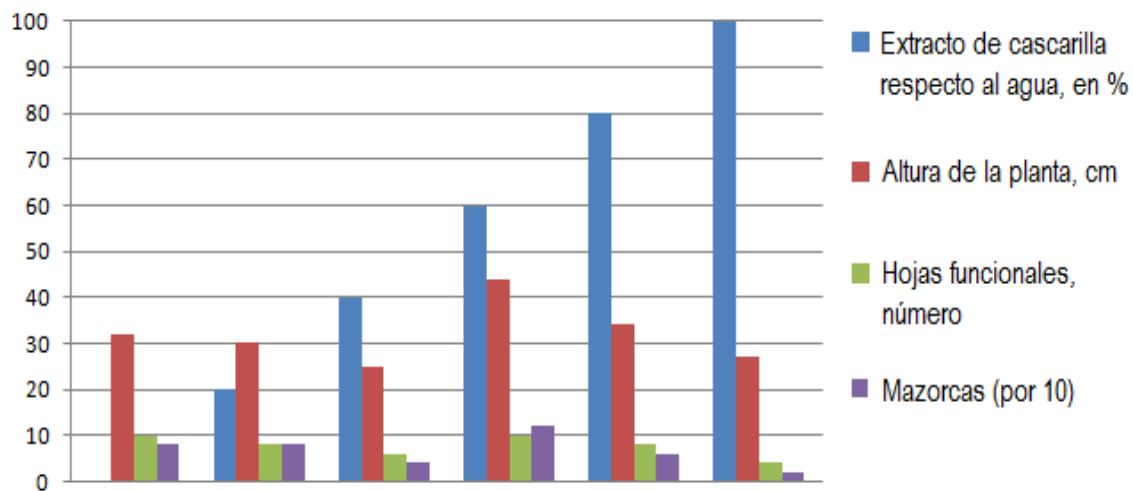


Fig. 5.8 – Efectos del extracto de cascarilla en plantas de maíz

La gráfica con resultados de los experimentos con extracto de cascarilla no muestra tendencia alguna (figura 5.8). Los resultados de estos ensayos sugieren que algunas concentraciones, cercanas a 25% y a 60% de extracto en agua, pueden dar lugar a un mejor rendimiento: en su caso, 6 g de cascarilla por litro de agua o hasta 2.5 g por litro de agua. Se ha definido que los alcaloides del cacao, teobromina y cafeína, dan a la planta resistencia a enfermedades (Ashihara *et al.* 2008), la cual puede también mejorar el rendimiento. Habrá que realizar experimentos más amplios, pues si resultase eficiente el uso de extracto, puede ahorrarse mucho en trabajo y costos.

5.6 Efectos del vermicomposteo de cascarilla en capa delgada, en invernadero.

El composteo en capa delgada con cobertura de 2,300 g de cascarilla por metro cuadrado en el suelo y con cinco lombrices, sin mezclar el suelo, ofrece los resultados más aprovechables (Tabla 5.9): resultó mayor la capacidad de cambio ($44.4 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$; la media fue $41.81 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$) y también mayor la retención de humedad (31.3%, el doble que el testigo, media 25.9%); pero resultaron 4 lombrices por kg de suelo (menos de las cinco que originalmente se depositaron). La adición de $2070 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de cascarilla resultó en *el mayor contenido de COT* (165 g por kg de suelo), el segundo lugar en retención de humedad, 29.3%, la DA más baja ($86 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; media $89.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) pero no favorece a las lombrices. Las lombrices fueron favorecidas por la adición de cascarilla de $1840 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, de 5 aumentaron a 7 ($x = 4$), disminuyendo la DA ($88 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $x = 89.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) y con la retención de humedad (27.8 %, $x = 25.6\%$). $1150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de cascarilla favorecen a las lombrices y producen un aumento significativo en el COT. La aplicación de $1840 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de cascarilla también favorecen a las lombrices aunque se consume más sustrato se logra mayor retención de humedad.

El composteo en capa delgada con cobertura de $2,300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (1 cm de espesor) de cascarilla y con cinco lombrices sin mezclar el suelo, ofrece los resultados más aprovechables (Tabla 5.9): resultó mayor la capacidad de cambio, ($44.4 \text{ cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$, la media fue $41.8 \text{ cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$, *DS* 2.53). y también mayor la retención de humedad (31.3%, el doble que el testigo, media 25.9%); pero resultaron 4 lombrices por kg^{-1} de suelo. La adición de $2070 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de cascarilla resultó en *el mayor contenido de COT* (165 g por kg^{-1} de suelo), el segundo lugar en retención de humedad (29.3%), la DA más baja ($86 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) pero no favorece a las lombrices. Las lombrices fueron favorecidas por la adición de $1840 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de cascarilla, de 5 aumentaron a 7 ($x = 4$), disminuyendo la DA ($88 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $x = 89.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) con buena retención de humedad (27.8%, $x = 25.6\%$). $1150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de cascarilla también favorecen a las lombrices y producen un aumento significativo en el COT. $1840 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de cascarilla también favorecen a las lombrices y aunque se consume más sustrato se logra mayor retención de humedad.

Tabla 5.9 - Resultados de los tratamientos en maceta o tiesto

Bandeja número †	Peso inicial de suelo + cascarilla, g	Peso final, g Húmedo a Capacidad de campo	Seco al aire	Cobertura con cascarilla, g·m ⁻²	DA g·cm ⁻³	COT g·kg ⁻¹	CIC cmol _(c) ·kg ⁻¹	Lombrices número final
1	1000	959.6	801.8	0	0.98	116	39.4	3
3	1015.8	1089.6	825.1	460	0.91	137	38.9	4
5	1023.7	1114.5	842.4	690	0.90	127	44.4	4
7	1031.6	1129.0	830.0	920	0.91	145	40.0	4
9	1039.5	1188.9	892.4	1150	0.86	155	39.4	6
11	1047.5	1207.4	917.2	1380	0.90	147	43.8	3
13	1055.4	1221.0	885.4	1610	0.89	142	41.1	4
15	1063.3	1228.4	886.7	1840	0.88	143	41.6	7
17	1071.2	1250.1	883.0	2070	0.86	165	42.7	1
19	1079.1	1311.3	901.3	2300	0.89	140	44.4	4
2	1000	959.4	785.6	0	0.98	132	40.5	0
4	1015.8	1089.4	803.9	460	0.94	133	39.4	2
6	1023.7	1013.3	810.3	690	0.91	127	45.5	5
8	1031.6	1042.2	816.0	920	0.93	145	40.5	0
10	1039.5	1102.0	931.4	1150	0.89	134	40.5	0
12	1047.5	1045.4	862.6	1380	0.95	153	42.2	5
14	1055.4	1066.6	868.1	1610	0.89	142	40.0	0
16	1063.3	1094.9	891.8	1840	0.90	147	48.8	0
18	1071.2	1116.5	895.4	2070	0.86	153	40.5	1
20	1079.1	1081.1	871.7	2300	0.89	145	42.7	0

† impares, 1 a 19, no revueltas; pares, 2 a 20, revueltas.

Respecto a los lotes a los cuales se les revolvió la tierra, presenta más COT (153 g·kg⁻¹) y más lombrices el lote con 1380 g·m⁻² de cascarilla. El lote con 1840 g·m⁻² de cascarilla presenta el valor más alto en CIC, 48.8 cmol₍₊₎·kg⁻¹ (media = 42.06), tiene el segundo lugar en COT con 147 g·kg⁻¹, pero no fue favorable para las lombrices y su retención de agua fue baja con 18.5% (media = 19.5%). El lote

en el cual sobrevivieron las 5 lombrices, con $680 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de cascarilla, presenta el 2° lugar en CIC y el tercero en retención de humedad (20.3%, $x = 19.5\%$).

Mostraron tendencia a ganar peso los lotes en los cuales no se mezcló el suelo (impares), y tendencia a la pérdida aquellos en los que sí se mezcló (pares), exceptuando los lotes de $920 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ y $1150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ mezclados.

A partir de los resultados del peso respecto al tiempo, para cada lote, se obtuvo la línea de regresión cuya pendiente corresponde con el peso que finalmente ganaron o perdieron los lotes ($r^2 = 0.689$) y con la variación en el contenido de humedad ($r^2 = 0.694$); la ganancia o pérdida de peso corresponden a la ganancia o pérdida de agua ($r^2 = 0.815$), y por consiguiente a su retención (Apéndice 6a). La retención de humedad más elevada la presentó el lote 19, con 31.27 % de humedad frente al blanco sin mezclar 16.44 %; le siguen el lote 17 con 29.36% de humedad retenida, el 15 con 27.81% de humedad, el 13 con 27.5% de humedad, el 7 con 26.5% de humedad, y el 4 con 26.2% de humedad: en general, el suelo tratado con cascarilla de cacao tiende a retener más agua conforme es mayor la cantidad de material orgánico incorporado, como ocurre normalmente.

Tabla 5.10 tendencias de los tratamientos en maceta, mezclado o no mezclado: media, DS, Varianza

Macetas, tratamiento	Retención de agua, %	Cascarilla, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	DA $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	COT $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	CIC $\text{cmol}_{(c)}\text{kg}^{-1}$	Número de lombrices
Sin mezclar.						
Media	25.7	1242	89.8	141.7	41.6	4.0
DS	4.0	737	3.4	13.59	2.1	1.6
Varianza	16.1	543107	11.5	184.68	4.6	2.7
Mezcladas.						
Media	19.5	1242	91.4	141.1	42.1	1.3
DS	2.8	737	3.6	9.11	2.9	2.1
Varianza	8.2	543107	12.7	82.99	8.7	4.2

Al aplicar correlaciones en los lotes no removidos (impares) y en los removidos (pares) por separado, se encuentra que en las macetas sin remover la

relación entre la cascarilla y el peso húmedo final resulta alta ($r^2 = 0.669$; $r = 0.968$): la enmienda de cascarilla incide claramente en la capacidad de retención de agua, e incide también sobre la DA ($r^2 = -0.74$) y sobre el COT ($r^2 = 0.671$) finales. No hay correlación con el resto de los parámetros.

En promedio, los lotes no mezclados retienen más humedad (como es de esperarse) y en ellos sobreviven más lombrices, varían más la COT, la CIC y la retención de agua; sólo la DA varía menos (Tabla 5.10). En cambio, en los lotes mezclados aparece mayor variación en DA, COT, CIC a pesar de la mezcla (homogeneización): aunque las medias son cercanas a las del tratamiento sin mezclar, retienen menos humedad, y pierden materia orgánica por efecto del mezclado.

Las 6 lombrices en la maceta 9 equivalen a $700 \text{ lombrices} \cdot \text{m}^{-2}$, alimentadas con $1150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ de cascarilla: 1.64 g de cascarilla por 300 mg de lombriz producida (promedio, estimación gruesa), $210 \text{ g de lombrices} \cdot \text{kg}^{-1}$ de cascarilla. Las 7 lombrices de la maceta 15 equivalen a $819 \text{ lombrices} \cdot \text{m}^{-2}$, alimentadas con 1840 g de cascarilla, se traducen en 2.25 g de cascarilla por cada lombriz de 300 mg, 444 lombrices por kg de cascarilla.

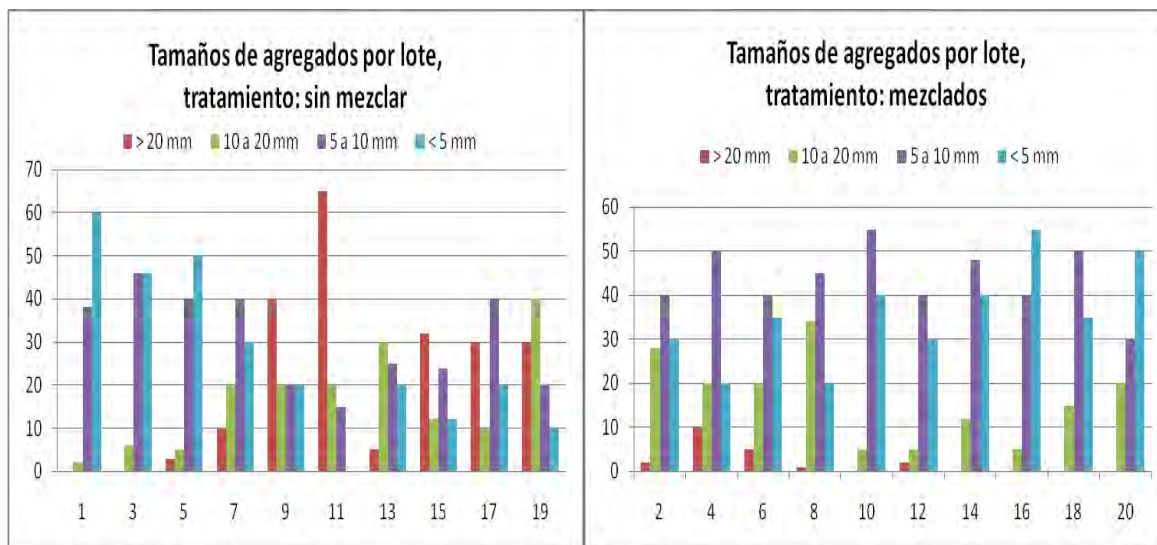


Fig. 5.9 – Proporciones de agregados en macetas con 5 lombrices y distintas dosis de cascarilla. Tamaños de agregados por diámetro (en mm) >20 mm, 30 a 10 mm, 10 a 5 mm, <5 mm.

Los resultados respecto a los agregados se presentan en la Tabla 5.11 y en la Figura 5.9. Los agregados mayores a 2 cm fueron más abundantes en los lotes sin revolver (promedio 21.5%, contra 2% en los mezclados), y también las lombrices (4 promedio en lotes no mezclados contra 1.3 en los mezclados), mientras que en los lotes pares mezclados las lombrices murieron y son más abundantes los agregados de diámetro 5 a 10 mm o menores (promedio 43.8%). Los agregados de mayor tamaño fueron más abundantes en los lotes 11, 9, 15, 17 y 19, en los cuales el número de lombrices es: 3, 6, 7, 1 y 1, respectivamente; el mayor número de lombrices se encontró en los lotes 15 (7 lombrices), 9 (6 lombrices), 6 y 12 (5 lombrices), que resultan muy dispares en cuanto a agregados de distintos tamaños.

Tabla 5.11 – Número de agregados (suma), por tamaño y cantidad, en macetas

Diámetro, cm	0.2 a 0.5	0.5 a 1	1 a 1.5	1.5 a 2	2 a 2.5	Total
Sin mezclar	271	314	97	71	223	976
Mezcladas	355	438	93	71	20	977
Total	626	752	190	142	243	1953

La prueba de χ^2 señala que en las macetas con tratamiento “mezcladas”, al remover la tierra se favoreció la formación de agregados más pequeños (Tabla 8.11), a costa de los agregados mayores a 2 cm ($\chi^2 = 191.2$ mayor que 18.47, nivel de significación $\alpha_{GL4, P < 0.001}$). La permanencia de las lombrices en las no mezcladas favoreció la formación de agregados más grandes, pero no tiene influencia clara en otros parámetros del suelo. Coq *et al.* (2007) encontraron, tras 5 meses de actividad de lombrices en suelo, mayor proporción de macroagregados (mayores a 2000 μm), pero aquellos presentaron menores contenidos de carbono orgánico.

La presencia y cantidad de micelio resultó muy variable. Se desarrolla poco micelio en los lotes sin cascarilla (Tabla 5.12, Figura 5.10), con escaso substrato para los hongos. En fases tempranas el micelio fue algodonoso, en fases posteriores a la termófila aparecieron sobre las hojuelas costras anaranjadas, o

costras color gris verdoso, probablemente colonias de bacterias o de hongos. La proporción de micelio en las macetas no mezcladas muestra una correlación alta, 0.8, con el COT, mientras en las macetas mezcladas el índice de correlación es 0.27: indica que los hongos juegan un papel importante en la integración de la cascarilla al suelo como materia orgánica. No hay correlación del micelio con otro parámetro.

Tabla 5.12 - Desarrollo de micelio (promedio), mayor a menor

Lote	Cascarilla	Micelio*	Lote	Cascarilla	Micelio
17	2070 g·m ⁻² no m	82.7	8	920 g·m ⁻² mez	9.2
13	1610 g·m ⁻² no m	61.9	18	2070 g·m ⁻² mez	8.3
11	1380 g·m ⁻² no m	60.3	12	1380 g·m ⁻² mez	7.0
15	1840 g·m ⁻² no m	52.1	14	1610 g·m ⁻² mez	5.6
7	920 g·m ⁻² no m	44.9	1	0 g·m ⁻² no m	5.5
9	1150 g·m ⁻² no m	40.8	20	2300 g·m ⁻² mez	4.8
5	690 g·m ⁻² no m	40.4	6	690 g·m ⁻² mez	4.0
19	2300 g·m ⁻² no m	39.9	10	1150 g·m ⁻² mez	4.0
3	460 g·m ⁻² no m	20.8	16	1840 g·m ⁻² mez	3.7
4	460 g·m ⁻² mezclado	12.4	2	0 (sin cascarilla) mez	0.4

no m = no mezclado mez = mezclado
 *Micelio: proporción de la superficie cubierta, en %

Se estima el efecto con la suma o con la media: en los lotes sin cascarilla apareció muy poco micelio, y en los pares el mezclado para buscar lombrices impidió el desarrollo notable de micelio. Experimentos posteriores dieron lugar al crecimiento de *Coprinus lagopus*; ningún otro hongo fue visible a pesar de que se inoculó la cascarilla de cacao con suelo de cacaotal de Teapa en unos casos y con suelo de cacaotal de Huimanguillo en otros (Jiménez, 2006).

El tratamiento que requiere menos manejo con mejores resultados, definido por los parámetros determinados en cada lote (Tabla 5.9) es el de 2300 g·m⁻². El tratamiento más favorable para mejorar la capacidad de cambio consiste en usar 1840 g·m⁻² de cascarilla, mezclando. El más adecuado para mejora el suelo sin

utilizar mucha cascarilla sería el de 1380 g·m⁻² no mezclado, y el mejor para crianza de lombrices (y para aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo) puede ser 1840 g·m⁻² no mezclado o 1150 g·m⁻² no mezclado.

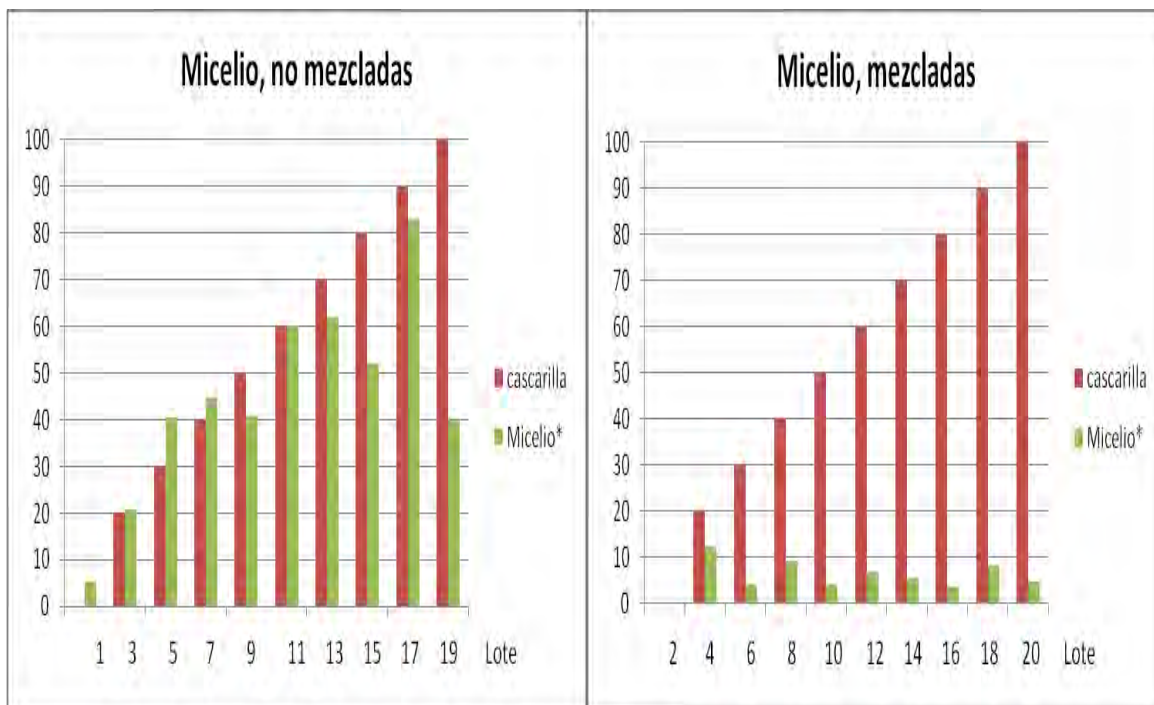


Fig. 5.10 .- Macetas con distintas dosis de cascarilla (en %), y micelio desarrollado (% de la superficie cubierta): sin mezclar, mezcladas.

En conjunto, los resultados indican que la cantidad de cascarilla adicionada (Tabla 5.9) influye aumentando la retención de humedad ($r^2 = 0.79$) y el carbono orgánico total ($r^2 = 0.68$), y disminuyendo la densidad aparente ($r^2 = -0.74$); pero no parece influir sobre los restantes parámetros. En los lotes en los cuales no se removió la tierra, la relación entre la cantidad de cascarilla y el peso húmedo final resulta muy alta ($r^2 = 0.968$), pues la enmienda influye claramente sobre la capacidad de retención de agua, y aún parece incidir un poco sobre la CIC de manera positiva ($r^2 = 0.562$). En cambio, cuando se remueve con frecuencia la tierra es menor el efecto sobre la retención de agua ($r^2 = 0.697$) y no influye sobre la capacidad de cambio ($r^2 = 0.277$). No puede señalarse influencia alguna por la presencia de lombrices: la correlación entre el número de lombrices y cualquier otro parámetro es menor a 0.3.

Las propiedades resultantes en el suelo responden a la cantidad de cascarilla agregada, que se incorpora como materia orgánica e incide de manera positiva aumentando la capacidad de absorción de agua, disminuyendo la compactación, e induciendo ligeros aumentos en la CIC (Tabla 8.9). La CIC ($r^2 = 0.444$) tiende a ser mas variable en los suelos mezclados (DS 2.95 en mezclados, 2.14 no mezclados), y difieren grandemente respecto a su capacidad de retención de agua ($r^2 = 0.062$) que es mayor ($x = 25.7\%$) en los suelos no mezclados frente a la de los mezclados ($x = 19.5\%$). Experimentos respecto a la influencia de las condiciones fisicoquímicas producidas por la enmienda han demostrado efectos semejantes (Naeini & Cook 2000, De Silva & Cook 2003): el mezclado tiende a aumentar la evaporación creando condiciones desfavorables, mientras bajo la cama de desechos vegetales (cascarilla en nuestro caso) tiende a mejorar la estructura y a aumentar la retención de agua, variable ésta más consistentemente asociada con el desempeño de los cultivos que la fertilidad del suelo (Martín et al. 2005). En los suelos no revueltos la trituración y descomposición de la hojarasca incrementa su capacidad de intercambio catiónico (Theng et al. 1989); en este caso la cascarilla se comporta como hojarasca o residuos de cosechas sin descomponer.

5.7 – Resultados del experimento de cultivo de lombrices en bandejas con proporciones bajas de cascarilla.

El experimento de cultivo de lombrices en bandejas con proporciones bajas de cascarilla, examinado a los 48 días, presentó las siguientes condiciones (Figura 5.11):

–las lombrices no presentaron señales de efectos adversos en ninguno de los tratamientos. Su biomasa fue, en promedio, 0.75 ± 0.05 g, 3 a 5 cm de largo, y su apariencia en general fue sana: su color gris, el de su sangre rojo oscuro, mostraron actividad (fototactismo negativo) al ser expuestas a la luz, y respondían a una ligera compresión.

–en el suelo se encontraron siempre agregados, pero con diferencias morfológicas: en el suelo sin cascarilla los agregados eran irregulares a

esferoidales, ligeramente friables a capacidad de campo (bandejas 1 y 2). En el resto de los lotes, con cascarilla, se encontraron tres tipos de agregados:



Fig. 5.11 – cultivo de lombrices en bandejas.

- Los formados a partir de las excretas de las lombrices, turrículos, cuya forma era como racimos globulares cuando húmedos, aproximadamente esferoidal cuando secos;
- Los formados por adhesión de partículas de suelo a los fragmentos de cascarilla que perdieron su aroma y color, en algún momento húmedos en su superficie, a la cual se adhirieron partículas minerales;
- Los formados por adhesión de las partículas de suelo, cuya apariencia era entre granular y en bloques subangulares.

Los resultados de este experimento (Tabla 5.13) no muestran asociación entre cantidad de cascarilla (agregada en proporciones pequeñas) y micelio, o entre cantidad de cascarilla y número de lombrices o sus capullos. Sin embargo, con una capa de cascarilla de 5% (115 g por metro cuadrado) se obtuvieron una vez y media más lombrices o sus capullos, y pueden indicar que esta dosis es adecuada para su uso en el campo.

Tabla 5.13 – Ensayo de vermicomposteo de la cascarilla de cacao: resultados.

Bandeja	Suelo, g	Cascarilla, g	Lombrices, número inicial	Lombrices, número final	Capullos, número final	Micelio, % de superficie
1	2,300	0	8	8	1	0
2	2,300	0	8	8	0	0
3	2,300	37	8	13	0	100
4	2,300	37	8	11	0	100
5	2,300	75	8	0	10	60
6	2,300	75	8	0	14	60
7	2,300	112	8	7	0	50
8	2,300	112	8	7	0	50
9	2,300	150	8	9	0	5
10	2,300	150	8	9	0	15

5.8 – Cultivo de lombrices en campo, lotes de 1 m².

A los 65 días de montado el experimento (Fig. 5.12), se examinó el horizonte superficial hasta 10 cm de profundidad en cada lote y se separaron las lombrices para evaluarlas, encontrando que su número había aumentado (Tabla 5.14).



Fig. 5.12 – cultivo de lombrices en lotes de 1 m².

Reagrupando los datos y calculando las medias, por diferencia de medias se puede señalar que a distintos tratamientos en campo corresponde una producción de lombrices distinta, ya que hubo diferencias significativas (Prueba de Dunnett, valor crítico 3.48, $F_0 = 2.298$; ANOVA $F_{0.05, 5.5} = 2.015$). El tratamiento con 1080 g·m⁻² de cascarilla presentó la media más elevada en producción de lombrices (58

por metro cuadrado, ver Tabla 5.15), pero también la variación más amplia (DS = 39.23); el tratamiento con 1890 g·m⁻² de cascarilla resultó el menos favorable y a la vez el más homogéneo (media 29 lombrices por metro cuadrado, DS = 7.59).

Tabla 5.14 – Cultivo de lombrices en campo: lote, cantidad de cascarilla y número de lombrices al final del experimento.

Lote núm.	Cascarilla g·m ⁻²	Número de lombrices	Lote núm.	Cascarilla g·m ⁻²	Número de lombrices
1	2160	58	17	1350	74
2	1890	39	18	2160	30
3	0	17	19	1350	6
4	1350	19	20	0	8
5	2160	58	21	0	41
6	1620	49	22	1080	115
7	1380	48	23	1890	21
8	1890	29	24	1050	54
9	1080	85	25	1620	50
10	1080	65	26	1350	76
11	1620	10	27	2160	77
12	1620	26	28	1620	18
13	0	11	29	1890	26
14	1350	92	30	1620	25
15	1080	20	31	2160	10
16	2160	9	32	1080	11

En los lotes con 1350 g·m⁻² de cascarilla se encuentra el segundo lugar en producción de lombrices (54.2 por m⁻²), y de acuerdo con los resultados del experimento en invernadero se asocia a una mayor capacidad de retención de agua ($r^2 = 0.8146$, ver Tabla 5.9). Los lotes con 2160 g·m⁻² de cascarilla presentaron el tercer lugar en desarrollo de lombrices, indicando que esta proporción es aconsejable para compostar —en campo— mayor cantidad de cascarilla en menor tiempo y espacio, con buena producción de lombrices.

Resumiendo: se pueden utilizar 2160 g·m⁻² de cascarilla para transformar la mayor cantidad en el menor tiempo, y se mejorarán algunas propiedades físicas del suelo favoreciendo el desarrollo de lombrices, sin mayor trabajo; y se pueden

utilizar 1080 g·m⁻², para producir la mayor cantidad de lombrices con la menor cantidad de cascarilla posible (Tablas 5.14, 5.15).

Tabla 5.15 – desarrollo de lombrices en campo, resultados agrupados.

Cascari- lla, g·m ⁻²	Número de lote	Lombrices (cantidad)	Suma	media	Diferen- cia	Lombri- ces · kg ⁻¹ de cascarilla (sin cas- carilla)
0	3, 13, 20, 21	17 + 11 + 8 + 41	77	19.3	0.0	(sin cas- carilla)
1080	9, 10, 15, 22, 24, 32	85 + 65 + 20 + 115 + 54 + 11	350	58.3	39.0	53.9
1350	4, 5, 14, 17, 19, 26	19 + 58 + 92 + 74 + 6 + 76	325	54.2	34.9	40.1
1620	7, 11, 12, 25, 28, 30	48 + 10 + 26 + 50 + 18 + 25	177	29.5	10.2	18.2
1890	2, 8, 23, 29	39 + 29 + 21 + 26	115	28.8	9.5	15.2
2160	1, 6, 16, 18, 27, 31	58 + 49 + 9 + 30 + 77 + 10	233	38.8	19.5	18.0

Cabe considerar que en los lotes con 1080 g·m⁻², aunque el promedio de lombrices·m⁻² fue 58.3, el número de lombrices está entre 11 y 115, la varianza es muy grande. Al colectar las lombrices, en el cacaotal se encontraron 83 lombrices por metro cuadrado en promedio, y se puede considerar que la producción de lombrices debería alcanzar al menos ese número. Pero en el mejor de los casos la producción de lombrices fue apenas tres cuartas partes de las encontradas en el cacaotal, de modo que el composteo de cascarilla de cacao en capa delgada no es útil para producir lombrices, de acuerdo con estos resultados.

5.9 – Experimento en campo: aceptación de la cascarilla de cacao por las lombrices, y aceptación de la composta por las lombrices.

En el terreno (figura 5.13) con cascarilla sin tratar se encontraron a los 48 días (marzo, abril) en promedio 45 lombrices por metro cuadrado (DS 10.8) con cascarilla; en el terreno cubierto con composta, 330 lombrices por metro cuadrado

(media; DS= 68.2). En el terreno con enmienda de 920 g de cascarilla por m² la población de lombrices creció 4.5 veces, la cascarilla como enmienda resulta favorable; la composta de cascarilla (920 g·m⁻²) es mucho más favorable, pues el número de lombrices aumentó 33 veces.

Se pueden comparar estos resultados contra las poblaciones de la especie en campo: Huerta et al. (2009) reportan en Tabasco la presencia de 23.5 individuos·m⁻² en selva lluviosa, 135.4 individuos·m⁻² bajo vegetación secundaria, 105.9 individuos·m⁻² bajo “cultivos diversificados” (cedro, teca, cacao, huertos familiares), 109 individuos·m⁻² bajo “cultivos no diversos (monoespecíficos: mango, plátano, maíz, caña de azúcar, mandioca, piña, pastizal inducido) y hasta 237 individuos·m⁻² en área urbana con vegetación riparia; bajo cacaotal sólo encontraron *P. corethrurus*.



Fig. 5.13 – Experimento con lombrices en campo, preferencia por cascarilla (color canela) o por composta (color negro).

Smeaton et al. (2003) encontraron, en el sur de Australia, entre 13 lombrices·m⁻² (septiembre) y 240 (invierno-primavera). Como ya se mencionó, las lombrices encontradas bajo el cacaotal de Puyacatengo fueron (en promedio) 83 por metro cuadrado, en su gran mayoría *P. corethrurus*, contra 330 lombrices en terreno preparado con composta de cascarilla. Sin embargo, en terrenos tratados la productividad puede ser más alta: Leroy et al. (2008) reportan 150 lombrices·m⁻² en suelo arable y hasta 900 lombrices·m⁻² en suelo tratado con estiércol y restos vegetales en Bélgica.

Pontoscolex corethrurus es una especie ampliamente utilizada para el vermicomposteo, en los países del continente americano, por su resistencia y su capacidad para aprovechar desechos (Pashanasi et al. 1996, Coq et al. 2007,

Huerta et al. 2009). Al parecer, los efectos que *P. corethrurus* ocasiona en los suelos pueden ser más beneficiosos que dañinos cuando sus poblaciones se mantienen bajo una cubierta abundante de desechos vegetales en cultivos. Tapia-Coral et al. (2006) reportan en el Amazonas peruano una alta productividad de *P. corethrurus* (14 individuos a partir de 3 iniciales) en la capa de 10 a 20 cm, en la cual fueron más abundantes los restos orgánicos introducidos, el carbono orgánico y el nitrógeno totales, y de las excretas; en éstas fueron mayores las poblaciones microbianas, y el contenido de bases cambiables; sugieren que el manejo de mezclas de los residuos vegetales (de rápida descomposición, por un lado, o de alta calidad por otro) puede ser provechoso en áreas que ya invadió esta especie. También son benéficas en agroecosistemas cuando no son muy numerosas, 100 a 150 individuos por metro cuadrado (Pashanasi et al. 1996). Pero donde fueron muy numerosas redujeron los contenidos de materia orgánica y aumentaron la formación de agregados grandes (Coq et al. 2007), produjeron la compactación en sistemas agroforestales y en pastizales de la región del Amazonas (Chauvel y Lavelle 1999, Tapia-Coral et al. 2006); y redujeron el carbono orgánico de los suelos cultivados con maíz en la Amazonia del Perú (Desjardins et al. 2004).

La variabilidad en los resultados de este experimento y los experimentos con cubas (3 kg de suelo) o con macetas (1 kg de suelo) permite expresar que puede haber una producción aceptable de lombrices con la cascarilla de cacao, pero es necesario realizar más experimentos para definir tendencias claras. El experimento con composta indica que es posible una producción importante de lombrices usando aquella, pero según los beneficios o daños que otros investigadores han encontrado, será necesario examinar los efectos en los suelos en que se desarrolle el vermicomposteo de cascarilla en capa delgada con estas lombrices, en experimentos más amplios.

5.10 – Lombricultura: costo de la producción de lombrices.

Conviene definir cuánto cuesta producir lombrices a partir de cascarilla de cacao, pues las lombrices “composteras” *Pontoscolex corethrurus* están a la venta

en el mercado. En febrero de 2007 se ofrecía el kilogramo de lombriz a \$ 450.00 en el Estado de México; se ofrecía también *Eisenia foetida*, aproximadamente 1000 individuos por kilogramo en \$ 2,055.00. En Veracruz, ya en mayo de 2009, se obtenía un kilogramo de lombrices por \$ 2,000.00. En junio de 2011 se ofrecía en el mercado el kg de lombriz a precios desde \$ 450.00 hasta \$ 2,055.00. A partir de este precio, y de el peso por individuo de las lombrices colectadas *Pontoscolex corethrurus* (300 mg por individuo), 1 kg de lombrices tendría alrededor de 3,333 individuos, y el precio por lombriz sería de 60 centavos. Un kilogramo de lombrices en presentación para la venta (con mucosidad e impurezas) puede estimarse contendrá 3,300 individuos, subiendo el precio por lombriz a 60.6 centavos.

En nuestro caso, el mayor número de lombrices producido en maceta, 700 lombrices alimentadas con 1840 g de cascarilla por metro cuadrado, significan un consumo de 2.63 g de cascarilla por lombriz. El rendimiento en peso fue 0.1142 kg de lombriz por kg de cascarilla, 210 g de lombrices·m⁻². Cuando el costal de 10 kg de cascarilla se nos vende a \$ 20.00, el kg de cascarilla cuesta \$ 2.00 y produce 114.2 g de lombrices (380 lombrices de 300 mg cada una), que multiplicadas por 60.6 centavos resultan en \$ 230.28 pesos mexicanos.

En el caso del experimento de campo, aplicando en cada metro cuadrado 920 g de cascarilla se obtuvieron 330 lombrices, que significan 99 g de lombrices: 0.098 kg de lombriz por kg de cascarilla o 9.8 % de rendimiento. Con la cascarilla a \$ 2.00 el kilogramo, 90 g de lombrices —a ¢ 60.6 cada una— cuestan \$ 54.54 pesos; \$ 606.00 pesos el kilogramo de lombriz. Al alimentarlas con composta las lombrices desarrollan más actividad y producción, pero el costo aumenta mucho por el cuidado que requiere la pila, pues 25 días de composteo conllevan cuidado intensivo (25 días pagados por persona, mas renta de suelo, etc) elevando el costo a casi \$ 9.00 por lombriz, cuando el precio más elevado en el mercado es de \$ 2.00.

En resumen, producir lombrices a partir de cascarilla de cacao no es redituable; sólo puede asumirse que su uso es beneficioso cuando logra mejorar

el suelo, a mediano plazo. Producir lombrices a partir de composta de cascarilla podría resultar redituable si se combina con otras enmiendas.

5.11– Cultivo de maíz con vermicomposta.

El terreno que se utilizó para plantar maíz en lotes al azar estuvo ocupado con árboles de melina que se talaron, y el tocón se extrajo con la mayor masa posible de raíces gruesas. Durante el desarrollo del primer cultivo el terreno presentó deflación en zonas en las cuales había árboles antes de emparejarlo, y no germinaron las plantas de maíz en esas zonas: cuatro lotes del Este, tres lotes del noroeste del terreno (Figura 5.14).



Fig. 5.14 – Cultivo de maíz tratado con vermicomposta, lotes al azar.

Se observaron diferencias entre el tamaño de las plantas de los lotes con tratamiento y las de los testigos, de modo que se dejaron crecer por cinco meses. Germinaron numerosas plantas, y maduraron produciendo mazorcas; pero muchas fueron atacadas por aves y roedores o cosechadas furtivamente, y no fué posible determinar el rendimiento.

Se aprovecharon los resultados referentes a número y tamaño de las plantas, hojas funcionales y mazorcas con desarrollo incompleto (“jilotes”), de este

primer experimento con plantación de maíz. Los resultados se presentan en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16 - Resultados del cultivo de maíz con composta y sin composta, experimento con lotes al azar				
	Plantas, número	Altura cm	Hojas funcionales	Mazorcas, jilotes
Con vermicomposta				
59 sitios				3.76 por sitio
Sumas totales	257	43440	2594	222
Media	4.36 / sitio	169.02	10.09	0.86 por planta
Mediana	4	176.5	10	1
Moda	2	152	11	1
Varianza	4.99	1720.78	3.91	0.30
Desv. Stand	2.69	41.482	1.98	0.55
Sin vermicomposta				
61 sitios				3.42 por sitio
Sumas totales	223	37466	2393	209
Media	3.65 / sitio	168.01	10.73	0.937 por planta
Mediana	2	177	11	1
Moda	1	198	12	1
Varianza	4.02	2074.93	4.81	0.45
Desv. Stand	2.15	45.65	2.19	0.67

$$t_0 = 57.369$$

Los puntos sin vermicomposta en los cuales se desarrollaron plantas fueron 61; el total de plantas, 223, con media de 3.65 plantas por punto, alcanzando una altura media de 168.01 cm. Las plantas presentaron, en promedio, 10.73 hojas y 0.94 mazorcas por planta.

Los puntos con vermicomposta en los cuales se desarrollaron plantas fueron 59, y se encontraron 257 plantas que se traducen en 4.36 plantas por punto. La

altura media fue de 169.02 cm, apenas un centímetro más que la media sin tratamiento; el promedio de hojas, 10.09, es menor, y el de mazorcas por planta es 0.864, también menor. Sin embargo, en las áreas con composta se produjeron en promedio 3.76 mazorcas por punto, contra 3.42 mazorcas por punto en aquellas en que no se aplicó.

Resumiendo: donde se aplicó vermicomposta hubo, significativamente 15% más plantas y 10% más mazorcas por punto. Aunque las plantas presentaron menor altura (7.3% menor), menor número de hojas (casi una menos, en promedio) y menor número de mazorcas por planta (7.8% menos), la variación en la estatura de las plantas fue menor (varianzas: sin vermicomposta 2074, con vermicomposta 1720). Hubo diferencia significativa en el desarrollo de plantas de maíz, el cual fue aparentemente mejor en los sitios en que se aplicó la vermicomposta.



Fig. 5.15 – cultivo de maíz con vermicomposta. Lotes experimentales = filas. La persona mide 1.80 m y posa junto a una planta con efecto de vermicomposta.

En diciembre se retiraron las plantas, se disgregaron los terrones, y se revolvió muy bien la capa superior (hasta 25 cm de profundidad) de todo el terreno, con pala y azadón. En enero se sembró con diseño por surcos alternados, y se llegó a la cosecha del cultivo (Figura 5.15). Los resultados se presentan en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17- Rendimiento de mazorcas y de semilla de maíz tratado con vermicomposta

Surcos sin composta	Peso de mazorcas (kg)	peso semilla (kg)	Surcos pares con composta	Peso mazorcas (kg)	Peso semilla (kg)
1	4	2.0	2	10	6
3	10	5.25	4	13	7.25
5	10	5.0	6	14	7.5
7	9	4.25	8	10	5
9	10	5.0	10	11	5.5
11	9	4.25	12	10	5.5
13	10	5.5	14	10	5
15	8	3.75	16	10	4.5
17	9	4.5	18	11	5.5
19	9	4.0	20	10	5
21	11	4.25	22	8	4.5
23	8	4.5	24	11	4.5
25	11	3.5	26	6	2.5
27	4	1.5			
14 surcos	122 kg de mazorcas	57.25 kg de grano	13 surcos	134 kg de mazorcas	68.25 kg de grano
Promedio	8.715 kg de mazorcas por surco	469.26 g por mazorca		10.3 kg mazorcas por surco	509.33 g por mazorca
		4089.29 g por surco			5250.0 g por surco
Varianza	4.835	1.304	Varianza	3.897	1.604
D S	2.199	1.142	D S	1.974	1.266
Rendimiento final		954.2 kg·ha⁻¹			1137.5 kg·ha⁻¹

Como puede verse (Tabla 5.17, Tabla 5.18), el rendimiento es mayor y más homogéneo en los surcos con vermicomposta, tanto en número de mazorcas (diferencia significativa, $t_o = 0.1099$, $F_o = 0.1575$) como en semilla ($t_o = 0.1075$, F_o

= 0.0208). El efecto favorable también se reflejó en el tallo, las hojas, y las flores (Tabla 5.18).

Tabla 5.18 – Productividad del maíz en los surcos nones (sin tratamiento) y en los surcos pares (con tratamiento)

Surcos impares sin composta	Sitios	Plantas, número	Altura media* en cm	Hojas, promedio*	mazorcas, promedio*	Espigas, promedio*
1	72	65	57.2	7.5	0.05	0.02
3	79	111	82.7	8.7	0.03	0.17
5	75	101	99.5	8.5	0.22	0.33
7	74	96	98.8	8.1	0.32	0.21
9	73	101	101.6	9.3	0.33	0.25
11	73	95	105.7	7.5	0.16	0.18
13	75	211	53.0	4.2	0.13	0.16
15	78	105	104.3	7.4	0.13	0.16
17	74	104	104.4	7.4	0.05	0.14
19	70	101	98.1	8.4	0.08	0.06
21	74	115	106.7	8.0	0.12	0.15
23	73	93	109.5	7.5	0.06	0.10
25	72	87	84.5	7.0	0.00	0.00
27	70	55	73.0	6.6	0.00	0.00
Promedios sin extremos	73.71 74.17	102.86 110	91.35 95.73	7.6 7.67	0.12 0.14	0.14 0.16
Surco (con composta) número	Sitios	Plantas, número	Altura media*	Hojas, promedio*	Mazorcas, promedio*	Espigas, promedio*
2	76	128	87.4	8.7	0.12	0.16
4	76	112	171.4	13.9	0.65	0.66
6	74	109	126.0	9.5	0.62	0.67
8	68	90	130.0	9.0	0.54	0.51
10	71	89	117.9	8.6	0.35	0.30
12	68	85	106.2	8.2	0.25	0.24
14	77	89	105.2	7.8	0.22	0.21
16	74	92	98.4	7.5	0.09	0.12
18	66	82	97.9	7.2	0.11	0.12
20	74	107	115.7	8.4	0.25	0.25
22	71	100	124.7	8.5	0.19	0.19
24	72	83	98.3	6.9	0.06	0.07
26	71	71	75.0	6.4	0.00	0.00
Promedios sin extremos	72.15 72.25	95.154 97.17	111.8 114.99	8.5 8.68	0.26 0.29	0.27 0.29

* promedio por planta

Se calcularon los promedios generales contando todos los surcos, y también los promedios descartando los surcos de los extremos (para evitar el sesgo por

efecto de borde, Tabla 5.18). Es notable que en los surcos con composta las plantas presentaron mayor productividad: los promedios son significativamente mayores en las plantas tratadas con vermicomposta (Prueba de $t_{\alpha 0.05}$ 12.89>>1.714). **El tratamiento con vermicomposta mejora en 16% el rendimiento del maíz (1137.5 kg·ha⁻¹ con vermicomposta, 954.2 kg·ha⁻¹ sin aquella).**

A las muestras del suelo en el cual se desarrolló este experimento se les denominó “R” como referencia al rancho de flores: “Rv” a la muestra del suelo tratado con vermicomposta, “Rs” a la de suelo sin vermicomposta, para identificarlas en laboratorio y para presentar los resultados, en los siguientes apartados.

5.12 – Cambios en los suelos. Los resultados generales del análisis de los suelos y materiales se presentan en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19 - Características de los materiales y suelos, comparadas contra los resultados de análisis de las fracciones extraídas por el método de Dabin.

Material o suelo	DA ⁽¹⁾	Carbono orgánico						CIC en cmol(+)kg ⁻¹	pH 1:2.5		N t ⁽²⁾
		COT ⁽²⁾	C H ₃ PO ₄	C _{AF} ⁽³⁾	C _{AH} ⁽³⁾	C _{huminas} ⁽³⁾	C _{materia orgánica libre} ⁽³⁾		H ₂ O	KCl	
Cascarilla	267	546.0	4.95	0.20	12.24	2.11	46.66	n. d.	4	--	51.5
Composta	344	443.0	3.51	4.99	11.70	9.80	32.56	n. d.	7.0	5.5	89.0
Tsin	1280	17.2	0.46	2.79	4.26	0.36	1.59	30.10	5.3	4.5	3.2
Tcas	1160	20.3	0.32	1.40	7.98	0.24	1.83	38.61	6.5	5.9	2.1
Tcom	1120	38.3	0.35	7.18	6.92	0.90	3.25	54.44	5.9	5.6	6.8
Rs	970	89.7	1.73	2.39	20.75	0.19	6.88	38.61	4.0	3.4	6.3
Rv	1030	63.3	0.55	6.58	15.96	4.04	4.65	28.96	4.3	3.3	6.1

(¹) en kg · m⁻³; (²) en g · kg⁻¹ (³) en % del COT

La densidad aparente es mayor en la composta que en la cascarilla, resultado de la degradación de compuestos orgánicos y compactación de los remanentes (Thomson, 2001). En el suelo T, la DA disminuye al incorporar cascarilla pero disminuye más al incorporar composta; las lombrices, favorecidas por aquella, contribuyeron a esa disminución en la DA, al aumento del COT, del nitrógeno y de las huminas en el suelo Tcom. En cambio, en el suelo R varios parámetros apuntan hacia la degradación y pérdida de la materia orgánica en este suelo después de tratarlo con vermicomposta: el aumento en la densidad aparente, y la disminución en el COT, en la CIC y en el N total. A continuación se discuten los resultados de cada experimento.

a) Suelo T tratado con lombrices: sin enmienda Tsin, con enmienda de cascarilla Tcas, con enmienda de composta Tcom.

Los resultados de las determinaciones del carbono orgánico total y la capacidad de intercambio catiónico, en el suelo manejado con lombrices *Tsin*, con lombrices y cascarilla *Tcas* o con lombrices y composta *Tcom*, se presentan en la Tabla 5.20.

Tabla 5.20 – COT y CIC en el suelo en el cual se desarrolló el vermicomposteo.		
Suelo	g C · kg ⁻¹ muestra	CIC en cmol ₍₊₎ kg ⁻¹ de suelo
T sin	17.2	30.1
T cas	20.3	38.6
T com	38.3	54.4

Tsin = suelo sin enmienda. Tcas = suelo con enmienda de cascarilla. Tcom = suelo con enmienda de composta.

Siguiendo las hipótesis iniciales, los constituyentes de la cascarilla transformados en sustancias semejantes a humus aportarían materia orgánica y aumentarían la CIC: al suelo tratado con cascarilla, mayormente al suelo tratado con la composta de cascarilla, o más aún al suelo tratado con vermicomposta.

Los resultados muestran, en efecto, que con respecto al suelo Tsin —sin tratamiento—, el suelo tratado con cascarilla (Tcas) presentó mayor contenido de carbono y mayor CIC, y tratado con composta (Tcom) presentó el doble de COT y

la más alta CIC (Tabla 8.19) comparados contra el mismo suelo T sin tratamiento. La correlación entre los valores de COT y los de CIC es alta ($r^2 = 0.954$), como lo señalaban los resultados del experimento de invernadero. Los contenidos en AH (Tabla 5.21), en cambio, presentan una condición inversa: el mayor lo tuvo el suelo sin tratamiento, le sigue el terreno con cascarilla, y por último el terreno con composta; se trata de la fracción más evolucionada o resistente, que se ve disminuida frente a la materia orgánica recientemente incorporada como desecho vegetal (cascarilla) o como composta.

Tabla 5.21 - Caracterización del carbono orgánico (técnica de Kononova) en el suelo T sin enmienda, con cascarilla y con composta†

Suelo	C g·kg ⁻¹	AH g *	AF _{PVP} g *	AF g *	Relación AH/AF
T sin	16.8	0.2898	0.0098	0.0488	5.938
T cas	19.9	0.1597	0.0490	No det.	No det
T com	32.6	0.1246	0.0029	0.0306	4.062

† media de dos determinaciones * Ácidos húmicos AH, ácidos fúlvicos adsorbidos en polivinilpirrolidona AF_{pvp}, ácidos fúlvicos AF, en gramos obtenidos a partir de suelo con 1 g de COT. No det. = no se determinó

En el suelo Tcas, la enmienda con cascarilla produjo aumento en el COT, mientras el carbono (de carbohidratos) en algunas fracciones húmicas disminuye, probablemente consumido por microorganismos y lombrices.

En el suelo Tcom los contenidos de carbono son mayores que los del suelo Tcas, probablemente porque la composta, ya trabajada por microorganismos, presenta compuestos menos susceptibles a la biodegradación que la cascarilla.

La extracción de sustancias húmicas con el método Dabin dio lugar a los resultados que se presentan en la Tabla 5.19 (sección Carbono orgánico). La enmienda con cascarilla da lugar a un aumento en el COT y en las fracciones de AH y de MO Libre, y a la vez a una reducción en las fracciones AF y huminas. En cambio, la enmienda con composta da lugar a un incremento considerable en todas las fracciones, mayormente en AF (factor 2.6) y huminas (factor 2.5), la MO libre al doble y los AH en 1.6 (Fig. 5.16). La MO “ligera”, no humificada, disminuye con las enmiendas.

Los valores de la proporción AH/AF en suelos (determinados a partir de los extractos sin purificar) estarían entre 0.3 y 2.5 (Stevenson y Elliot 1989; Kononova 1966). Si los AH dan lugar a los AF por oxidación y degradación (Hatcher y Spiker 1988), en los sistemas aeróbicos más degradados los AF predominarán sobre los húmicos y la relación AH/AF resultará menor.

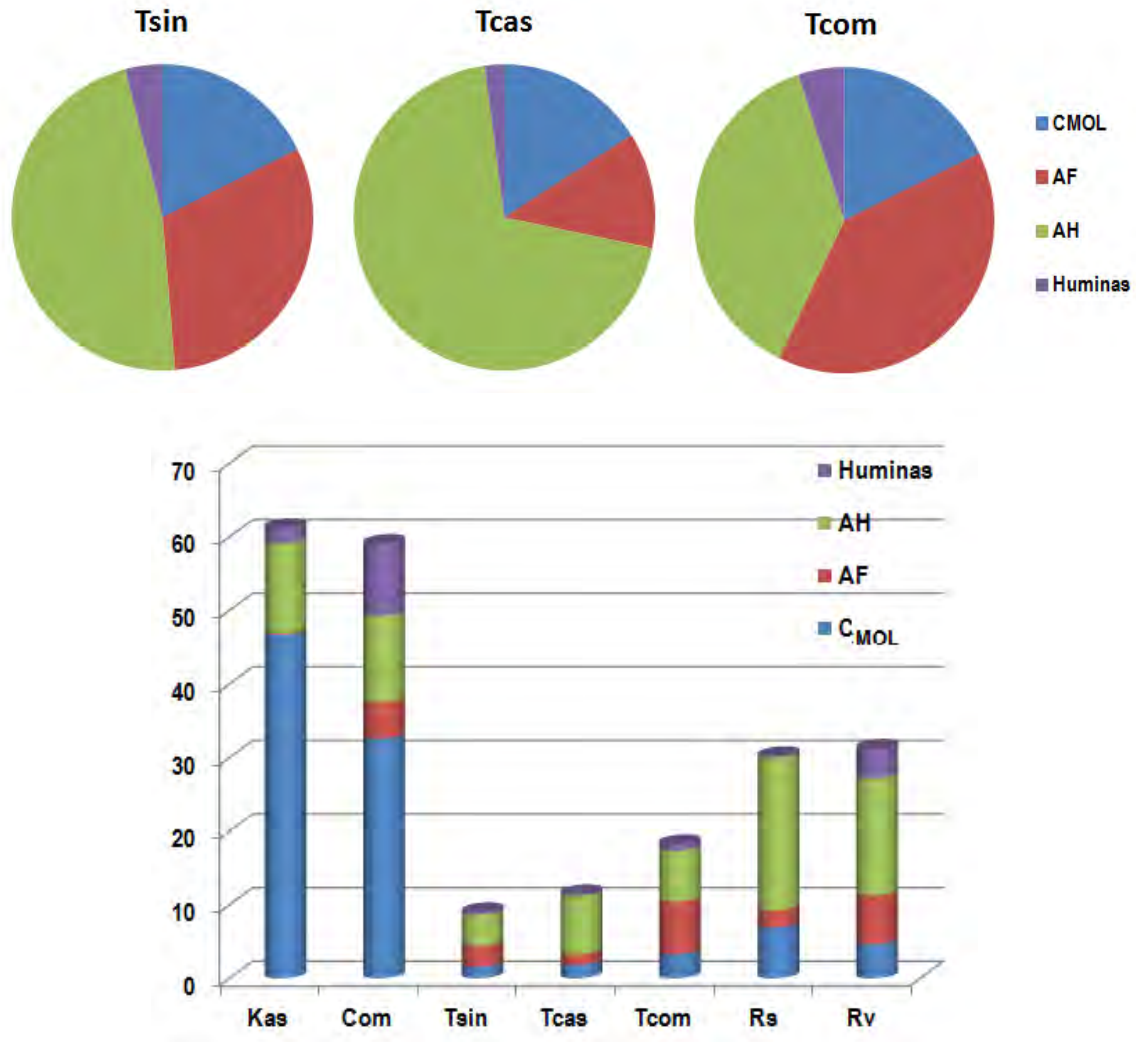


Fig. 5.16 – Proporción en el COT del CO libre y las fracciones húmicas, método Dabin.

La proporción AH/AF resultó de 5.70 en Tcas, 1.52 en Tsin, y 0.96 en Tcom. En Tcas la proporción elevada de “AH” puede deberse a los grupos alifáticos, ligninas y proteínas que aportó la cascarilla de cacao; las proporciones AH/AF

señalan la presencia de materia orgánica resistente y reciente en Tcas, y la rápida transformación de la materia orgánica en Tcom.

A la luz de los nuevos conceptos sobre las sustancias húmicas, el pH es mayor en el suelo con material menos evolucionado (Piccolo 2001), y en este caso el orden es Tcas>Tcom>Tsin, más acorde con la menor madurez de la MO en el suelo con cascarilla y la mayor en el suelo sin tratamiento.

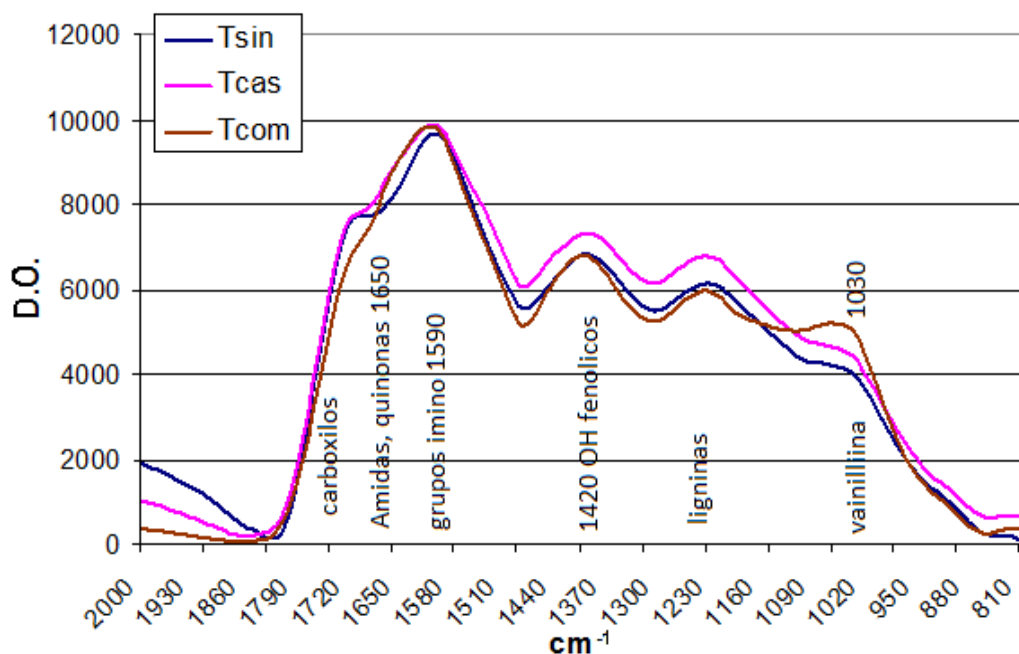


Fig. 5.17 – Espectros infrarrojos de las fracciones de AH del suelo en el cual se realizó vermicomposteo, “suelo T”, rango 2000–800 cm^{-1} .

b) Espectros IR de las fracciones de extractos AH, AF, y AH_{PVP}

De acuerdo con los espectros IR de la fracción AH (2000 a 800 cm^{-1}), en el suelo Tsin (Fig. 5.17 y Tabla 5.22) se observa un hombro en la banda a 1620 cm^{-1} y otro en 1720 cm^{-1} de los grupos carboxilos, hombro que es menos notable en el tratado con cascarilla Tcas y prácticamente desaparece en el tratado con composta Tcom. Aumentaron con la adición de cascarilla y con la de composta los grupos aromáticos y quinónicos en 1620 cm^{-1} , la intensidad del hombro en 1720 cm^{-1} , y diferentes vibraciones de grupos funcionales propios de las ligninas (1600 a 1590 cm^{-1}); a 1590–1517 cm^{-1} es apenas mayor la presencia de grupos

carboxilo (o amidas II, tomando en cuenta que el comportamiento es semejante al del nitrógeno total, ver Tabla 5.24).

Tabla 5.22 - Valores de la absorción (UA·10⁴) por grupos significativos. Resumen de los resultados en los espectros IR de la fracción ácidos húmicos.

Frecuencia (cm ⁻¹), y asignación de las bandas	Suelos, materiales						
	Tsin	T cas	Tcom	R s	R v	Com	Kas
3400 –OH alifático, fenólico, cadena lateral	4839	4920	5629	5323	5305	5710	7401
2920 C-H alifático	6130	6411	5396	6722	6653	5236	9398
2600 C=O R-COOH carboxilo (y 1725)	4403	4041	3080	5003	4957	1364	4967
1725 C=O en ésteres	7724	7788	7019	8207	7808	6668	8289
1720 C=O C=C carboxilos.	7740	7827	7142	8287	7838	6946	7910
1660 a 1630 C=O amidas I, R-CO-R cetonas conjugadas	8618	9236	9264	9132	8266	9403	9802
1650 amidas I	9141	9571	9611	9619	8358	8961	9339
1620 grupos aromáticos, quinonas, carboxilos conjugados	9672	9877	9826	9919	8519	7993	7686
1590 a 1560 imino =NH	8341	8647	8147	7932	9194	6864	7561
1540 amidas II	6779	7412	6614	8053	7173	6397	7242
1510 grupos aromáticos	5730	6237	5331	6950	6364	4702	6745
1450 grupos vainillil, siringil	6370	6932	6381	6569	7398	5061	7378
1420 OH fenólicos, vainillil, siringil	6821	7318	6808	7716	6656	5091	7087
1400 – 1390 OH fenólicos	6686	7219	6539	7657	6719	4904	7225
1280 COOH	5919	6583	5738	6257	6987	4433	6014
1230 OH de COOH (<i>p</i> - hidroxibutirato, <i>p</i> OHb)	6014	6633	5785	7059	6377	3909	6468
1130 grupos siringilo	4462	4958	5011	5397	5264	3249	6134
1120 a 950 carbohidratos	3252	3642	3820	4534	4722	2223	5902
1050 metoxilos	3962	4358	4961	5461	5499	2930	7673
1030 metoxilos (vainillil, siringil)	3507	3867	4244	5055	5260	2278	7449
840 <i>p</i> OHb, vainillil, siringil; CH aromático	182	686	352	1171	1659	123	402
2920/1510. Aromaticidad	1.069	1.027	1.012	0.967	1.045	1.113	1.393
1720/1510, indicador de incremento en grupos ácidos de las moléculas húmicas	1.35	1.25	1.34	1.19	1.23	1.48	1.17
1330/1270 siringil/guayacil	0.917	0.921	0.897	0.939	0.952	0.944	0.998

La madurez en los compuestos húmicos se relaciona con una menor presencia de metoxilos (Guagnini et al. 1961; Romera, 2006); en este caso se manifiesta con valores más elevados en el espectro de Tcom (menos maduro), seguido por el de Tcas, y los más bajos se observan en Tsin (el más maduro).

El índice de aromaticidad (2920/1510) resulta mayor en el suelo sin enmienda (T sin 1.07), intermedio en el suelo con cascarilla (T cas 1.03), y menor cuando se agregó la composta (T com 1.01). La aromaticidad de la fracción "AH" disminuyó al enmendar con cascarilla y aún más al hacerlo con composta, indicando la ruptura de anillos aromáticos por oxidación. El índice 1720/1510 (Tabla 5.22) que indica la proporción de grupos funcionales ácidos en las moléculas húmicas, es mayor en el testigo sin tratamiento Tsin; el tratado con composta Tcom tiene el segundo lugar (en el suelo T) dada la presencia de los grupos conjugados quinona y cetona resultado de la oxidación de los anillos en las ligninas (Hatcher y Spiker, 1988), durante la degradación de la composta.

Los datos para los espectros IR obtenidos se procesaron con programas para incrementar su resolución (Almendros y Sanz 1992); se presentan a continuación las gráficas obtenidas de la fracción de AH del Fluvisol éutrico o suelo T, las cuales confirman lo señalado a partir de los datos ya comentados (Figura 5.18).

Al comparar estos espectros puede notarse:

La curva correspondiente al terreno sin enmienda Tsin presenta absorbancias semejantes a las del terreno con cascarilla Tcas o con composta Tcom en casi todas las bandas, excepto en dos: el hombro a 1660 cm^{-1} que indica presencia de grupos amida, se observa más pronunciado en Tcas y en Tcom que en Tsin; en Tcas es notable un hombro a 1420 cm^{-1} de ligninas residuales de la cascarilla; y la banda alrededor de 1030 cm^{-1} que indica la presencia de grupos metoxilo en ligninas residuales provenientes de la cascarilla de cacao, más pronunciada en Tcom pues persisten las ligninas y los grupos fenol tras el vermicomposteo.

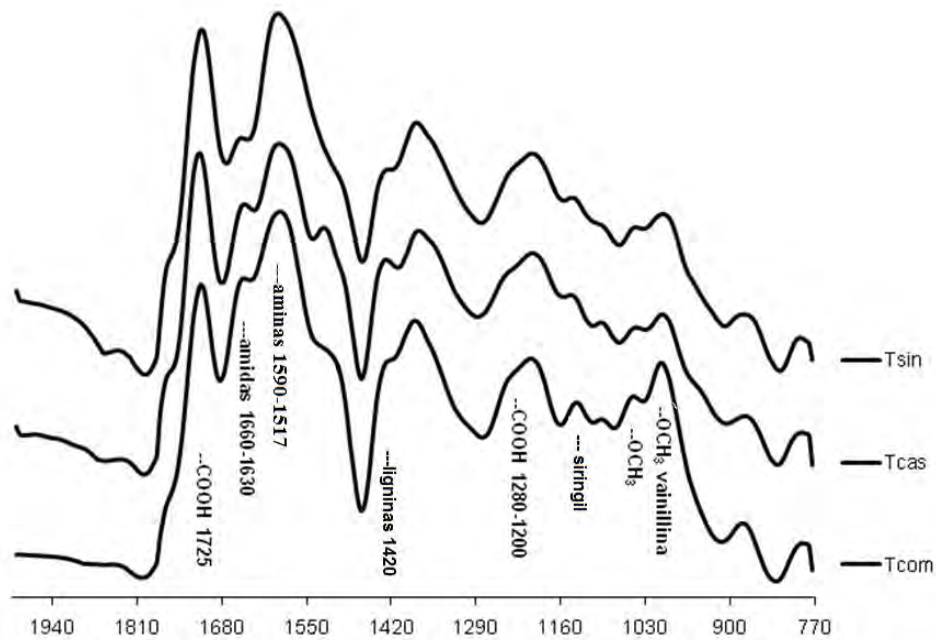


Fig. 5.18 – Espectros IR, con resolución aumentada, de la fracción AH, extractos del suelo T: sin enmienda Tsin, con cascarilla Tcas, con composta Tcom.

Los espectros FTIR 2000 a 800 cm^{-1} (significativos respecto a humificación) de la fracción ácidos fúlvicos en Tsin, Tcas y Tcom se presentan en la Figura 5.19. Muestran persistencia de la banda cercana a 1030 cm^{-1} correspondiente a grupos fenólicos. En el suelo tratado con cascarilla (Tcas) el tratamiento aumentó ligeramente los contenidos en grupos C–H alifáticos (1460 cm^{-1}). En estos extractos se manifiestan menos polisacáridos (banda 1086 a 1060 cm^{-1}), como efecto de la enmienda con cascarilla o con composta, y las absorbancias a 1590–1517 cm^{-1} presentaron diferencia en amidas entre los extractos, un poco mayor en el suelo tratado con composta Tcom (ver espectros de la cascarilla y la composta, Figs. 5.5 y 5.6). Los valores correspondientes a amidas I (a 1650 cm^{-1}) en esta fracción son elevados (Tsin 8986, Tcas 9474, y Tcom 9534), e indican la presencia de formas estables de N.

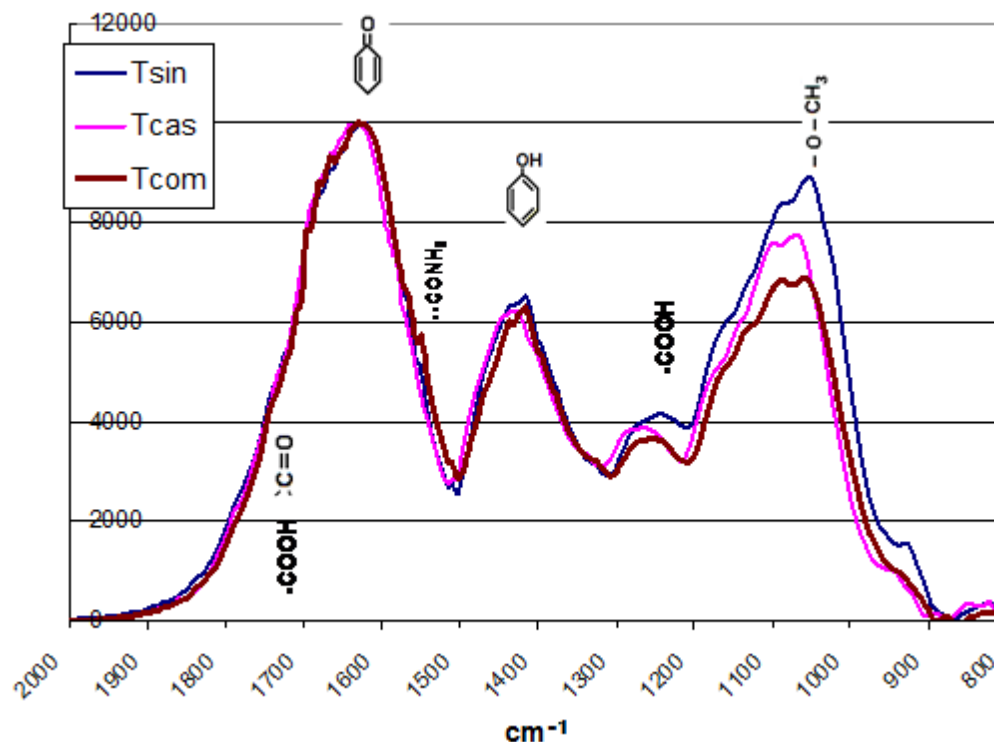


Fig. 5.19 – Espectros IR, fracción AF, del suelo T: Tsin –sin tratamiento, Tcas –tratado con cascarilla, Tcom –tratado con composta.

En los espectros con resolución aumentada (Fig. 5.20), los AF del suelo tratado con cascarilla Tcas muestran una banda de 1660 a 1630 cm^{-1} indicativa de amidas o quinonas, y otra hacia 1130–1050 cm^{-1} que señala la presencia de polisacáridos (también abundantes en la cascarilla: véase Fig. 5.5); y la banda en 1100–1025 cm^{-1} puede indicar también metoxilos de las pectinas presentes en la cascarilla (Barazarte *et al.* 2008); hacia los 1230, 1130, 1030 y 840 cm^{-1} , bandas que manifiestan la presencia de grupos vainillil y siringil; y hacia 1720 cm^{-1} un hombro correspondiente a grupos ácido (el de menor intensidad respecto a los tres tratamientos). El suelo con composta Tcom presenta también hombro hacia los 1720 cm^{-1} , que coincide en intensidad con el espectro de Tsin; el pico más pronunciado a 1670–1630 cm^{-1} , que manifiesta la presencia de quinonas aportadas por la composta (ver Fig. 5.5); un hombro hacia 1430–1390 cm^{-1} de las uniones C–H alifáticas o presencia ligeramente mayor de grupos OH fenólicos, y un hombro hacia 1220 cm^{-1} (OH fenólicos de grupos vainillil y siringil) que coincide con el del suelo sin tratamiento. También es notable en Tcom un hombro de 1110

a 980 cm^{-1} , que corresponde a grupos metoxilo de lignina, en las unidades de tipo vainillil y siringil; hacia los 1060 cm^{-1} indican la presencia de polisacáridos o de grupos producto de la oxidación de ligninas; dado que el suelo sin tratamiento presenta valores ligeramente menores, estos grupos se formarían a lo largo del composteo.

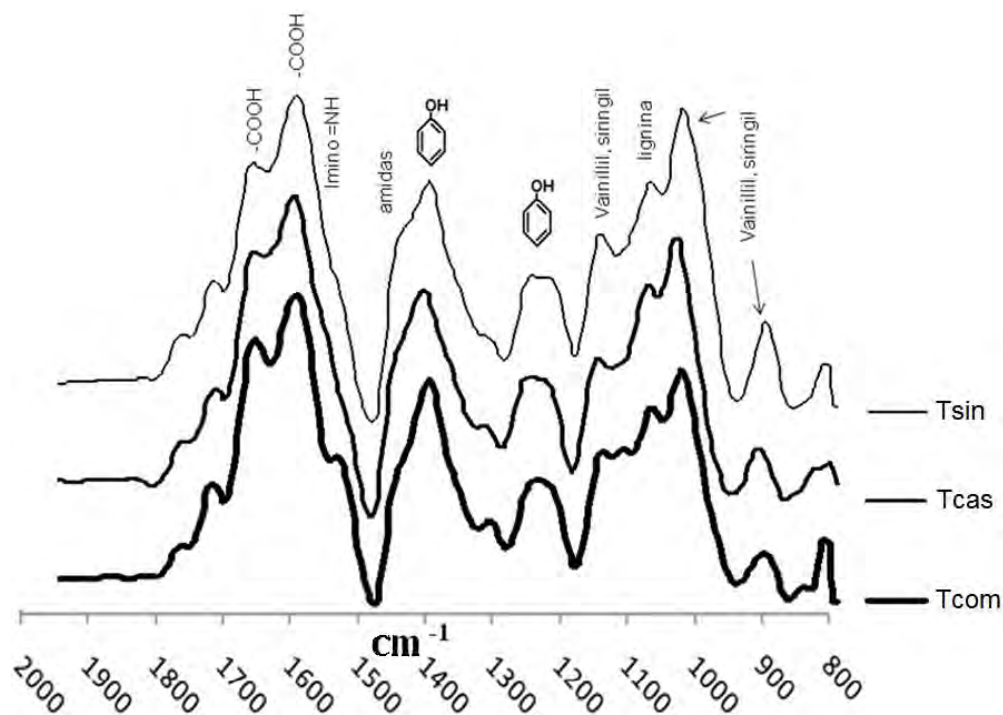


Fig. 5.20 – Espectros IR (2000 a 800 cm^{-1} , AF, resolución mejorada) de suelo Tsin, Tcas, Tcom.

Respecto a las fracciones coloreadas adsorbidas en polivinilpirrolidona de los extractos del suelo T (Fig. 5.21), el mayor contenido de carbono se encontró en el suelo Tcas, y el más bajo en el suelo Tcom. La adición de cascarilla al suelo incrementa sólo la fracción de sustancias coloreadas, reportadas aquí como AF adsorbidos en polivinilpirrolidona. Así, cuando el suelo T se ha tratado con composta aumenta la proporción de carbono orgánico, pero sólo en la fracción lábil de la materia orgánica.

El tratado con composta (Tcom) presenta valores mayores en la banda 1690–1635 cm^{-1} —vibración de quinonas o cetonas conjugadas—; la banda 1543–1538 cm^{-1} correspondiente a amidas (proteína), y la banda en 1100 a 1025 cm^{-1} producida por polisacáridos o pectinas, compuestos presentes en la cascarilla (Barazarte *et al.* 2008) y probablemente también en la composta (Fig. 5.6) que no son rápidamente degradados en este suelo. Los índices de aromaticidad ordenados de mayor a menor son: Tsin 1.6866, Tcas 1.3954, Tcom 1.2088, é indican que el composteo y el vermicomposteo reducen la aromaticidad, también en la fracción AF de estos suelos.

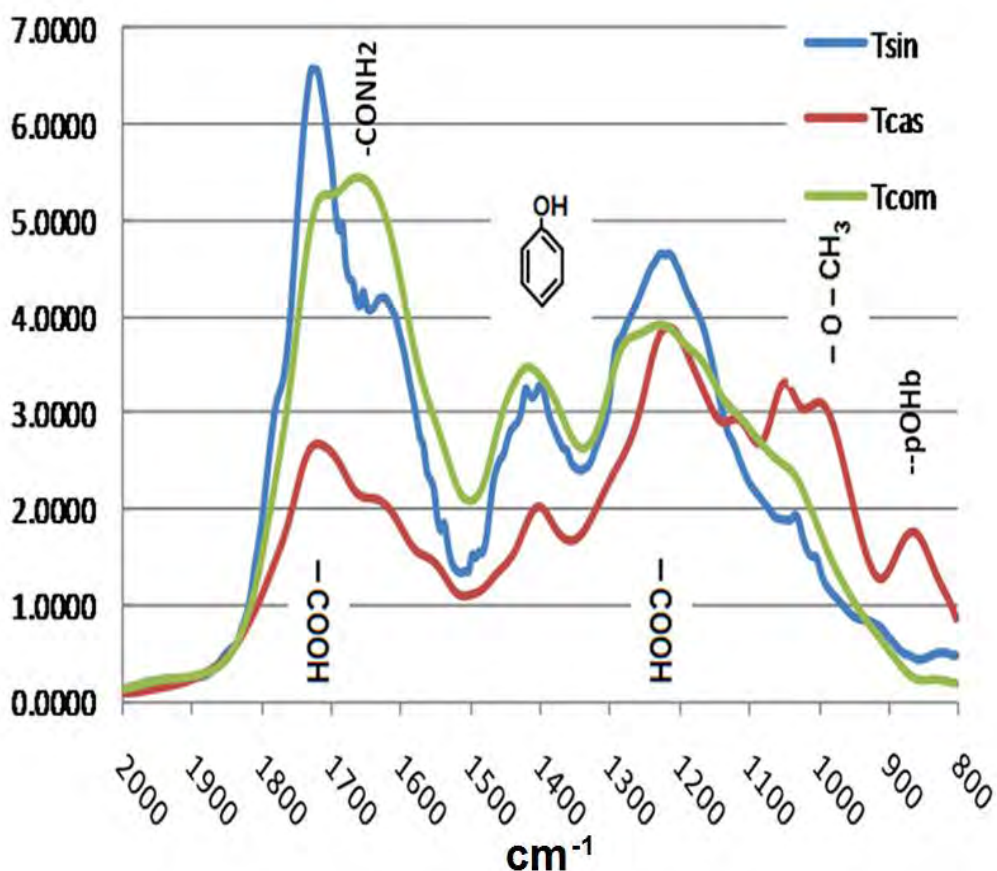


Fig. 5.21 – Espectros IR, 2000 a 800 cm^{-1} , de las fracciones adsorbidas en PVP, del suelo T.

En general, los espectros de la fracción coloreada adsorbida en PVP (fig. 5.21) corroboran lo observado en las fracciones AH y AF. Los grupos funcionales más evidentes indicarían la degradación oxidativa mencionada al discutir los resultados del método Dabin.

c) Suelo R cultivado con maíz, sin vermicomposta Rs y con vermicomposta Rv.

En el terreno R, en el cual se sembró maíz, la vermicomposta dio lugar a un mayor rendimiento en la cosecha donde se aplicó (suelo Rv), pero tanto la capacidad de cambio como el contenido en carbono orgánico y los contenidos de nitrógeno resultaron menores. También aquí corresponde mayor CIC a mayor COT ($r^2 = 1$).

La extracción de sustancias húmicas con el método de Dabin dió lugar a los resultados presentados en la Tabla 5.23 y en la Figura 5.22.

Tabla 5.23 Carbono oxidable en las distintas fracciones obtenidas por la técnica de Dabin, suelo R (experimento con maíz)

Muestra	COT g·kg ⁻¹	C H ₃ PO ₄	C _{AF} *	C _{AH} *	C _{MOL} *	C _{Huminas} Totales	Relación AH/AF
Rs (sin vermicomposta)	89.7	1.73	2.39	20.75	6.88	0.19	8.68
Rv (con vermicomposta)	63.3	0.55	6.58	15.96	4.65	4.04	2.43

*en % respecto al COT

Las muestras de suelo R presentaron contenidos de COT mayores que el terreno T en el cual se desarrolló el composteo, y el terreno sin composta Rs presentó un porcentaje de carbono orgánico mayor que el de los restantes tratamientos (Tabla 5.19). La proporción de COT es menor en el suelo con vermicomposta, y en cambio aumenta el carbono de AF casi al triple (2.75 veces) y el de huminas 21 veces (Tabla 5.23). Esto indica que la composta se degradó aportando nutrientes que fueron aprovechados por las plantas y por los microorganismos del suelo, funcionando como enmienda o abono. A la vez, aumentan los AF al aportar con la vermicomposta materia orgánica resistente, y las huminas totales, a lo cual habría contribuido la actividad de las lombrices, que mezclaron la materia orgánica con las arcillas.

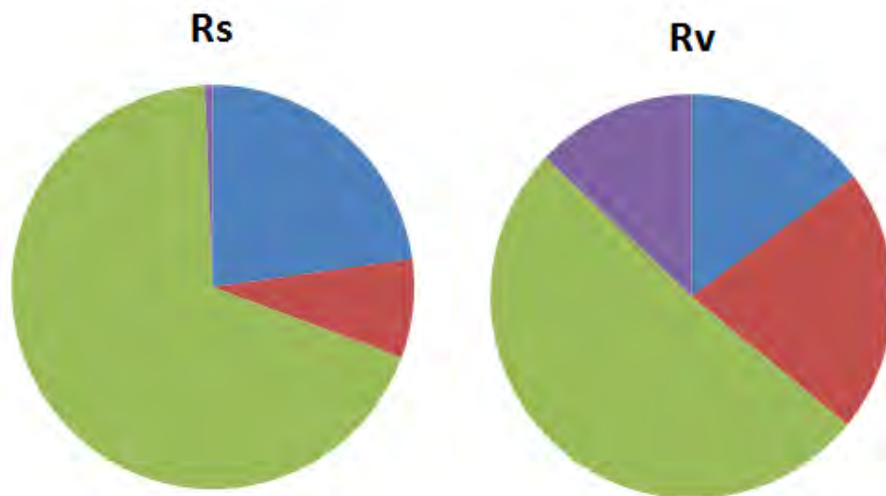


Fig. 5.22.- Proporción en el COT del CO libre y las fracciones húmicas, método Dabin. Suelo R (Acrisol húmico), Rs sin vermicomposta, Rv con vermicomposta.

La proporción AH/AF es 7.08 en Rs, 2.43 en Rv, y señala la condición de materia orgánica reciente y su rápida degradación en Rv.

Los contenidos en grupos funcionales (Tabla 5.22) en el suelo con vermicomposta Rv, son menores que los del suelo Rs excepto en la banda de 1590 a 1560 cm^{-1} de grupos imino, 1450 cm^{-1} de vainillil, 1280 cm^{-1} de grupos ácidos, 1120 a 950 cm^{-1} de vainillil y siringil (incluyendo a 1050 metoxilos), todos los cuales pueden haber derivado de la lignina persistente en la vermicomposta.

Los espectros IR de cada extracto de la fracción AH (Fig. 5.23) revelan que el terreno tratado con composta **Rv** resulta cercano al testigo **Rs** en grupos ácido (hacia 1725 cm^{-1}), metoxilos de ligninas (a 1050 y 1030 cm^{-1}), carbohidratos (1010 cm^{-1}), y anillos aromáticos sustituidos (840 cm^{-1}). En el terreno sembrado con maíz, denominado aquí suelo R, todas las bandas aparecen menos pronunciadas en la muestra del suelo al cual se aplicó vermicomposta Rv, aunque resultan notables los hombros en las bandas 1660–1630 cm^{-1} que indican amidas o quinonas, y 1600 que corresponden a constituyentes aromáticos (1590 a 1517 de grupos nitrogenados), y significarían la conservación selectiva de grupos derivados de ligninas (que también se encuentran en la cascarilla), pues Rv presentó menos nitrógeno total que Rs.

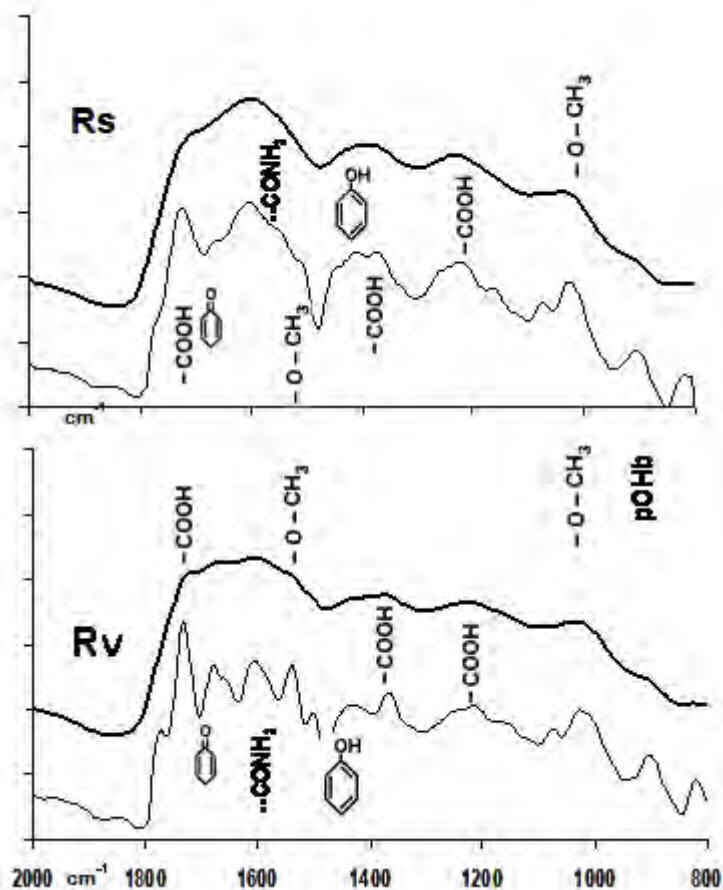


Fig. 5.23 – Espectros IR de las fracciones AH del suelo **Rs** y del suelo **Rv**. Bajo cada espectro se representa el espectro IR de resolución aumentada.

Los espectros obtenidos a partir de la fracción AH sometidos a *resolución aumentada* (Figura 5.23) muestran que el terreno tratado con vermicomposta **Rv** presenta mayor proporción de grupos ácido (en la banda 1720–1725 cm^{-1}) notablemente, y confirma la presencia en **Rv** de mayor proporción de amidas (bandas alrededor de 1660 cm^{-1} y alrededor de 1540 cm^{-1}) probablemente de origen microbiano (Paul y Clark 1996) y que también se manifiesta en las bajas proporciones C/N (Tabla 5.24).

El terreno **Rs** (sin composta) era superior en todos los demás grupos (Fig. 5.24). **Rv** presenta menor intensidad de las bandas de 1660 cm^{-1} a 1630 cm^{-1} de amidas, quinonas o cetonas conjugadas, y 1620 cm^{-1} de dobles enlaces en anillos

aromáticos (los valores más bajos de todos los suelos analizados, cuando en el suelo **Rs** no tratado y en **Tcom** como vermicomposta no fueron bajos).

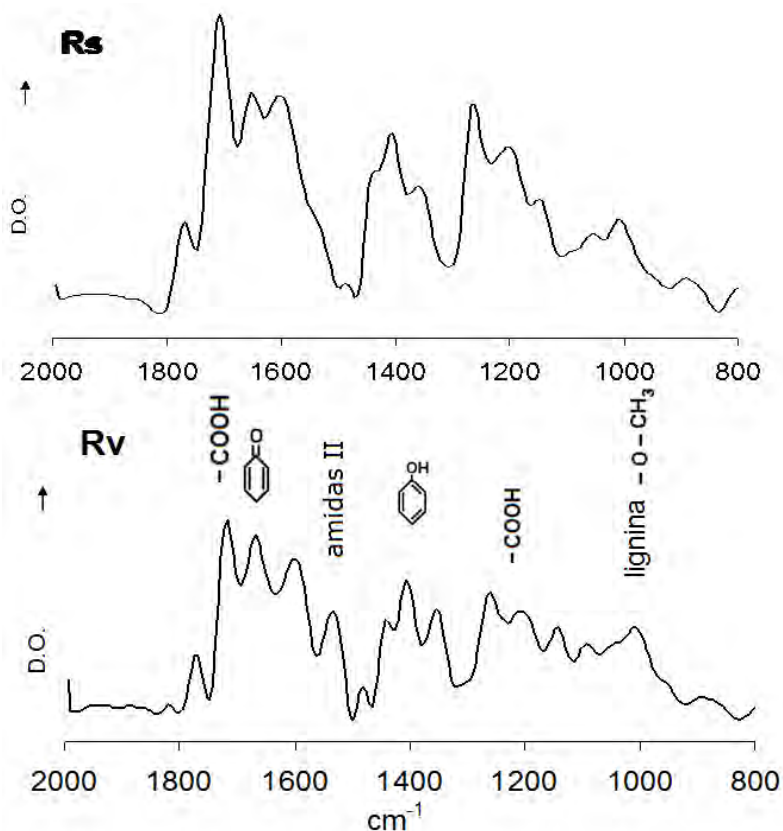


Fig. 5.24 – espectros IR de resolución aumentada, fracción AF de las muestras de suelo sembrado con maíz Rs sin tratamiento y Rv con vermicomposta.

El índice de aromaticidad tiene un valor una décima más alto en **Rv** (1.045), que en **Rs** (0.967); el índice 1720–1510, cuatro décimas más elevado, sugiere que aumentó la proporción de grupos ácido o carboxilo en **Rv**, 1.23, frente al de **Rs** 1.19. Sugiere también que en las transformaciones domina la oxidación que rompe los anillos aromáticos de las ligninas. El terreno con maíz sin tratamiento (**Rs**) presentó el valor más bajo en el índice aromático 2920/1510 (Tabla 5.22): el contenido de grupos alifáticos (2920) es naturalmente el más bajo. En el terreno **R** hubo árboles de *Gmelina arborea* que se tiraron y se extrajo su raíz, preparándolo para el experimento de siembra de maíz; los restos de esos árboles pudieron aportar al suelo desechos vegetales con más grupos fenólicos (ligninas).

Hatcher et al. (1985) mencionan que la fracción de huminas puede consistir de ácidos húmicos fuertemente unidos a las arcillas, el material húmico con un alto contenido de carbono y poco soluble en álcali, las melaninas de los hongos y las estructuras parafínicas, y que también el material vegetal no descompuesto que no se ha extraído del suelo aparecerá como parte de la fracción de huminas.

El suelo **Rs** muestra la condición de suelo aeróbico con dominancia de las fracciones AH y AF sobre la de humina insoluble (Hatcher y Spiker, 1988), y con materia orgánica más evolucionada respecto a Tsin: Rsin se encuentra en la parte alta de un lomerío, mientras que Tsin se encuentra en la vega del río.

La fracción huminas de extractos de la composta, del suelo tratado con ésta Tcom, y del suelo con vermicomposta Rv, presentan valores de C relativamente elevados: la composta adicionada y las lombrices favorecidas con ella incrementaron esta fracción de huminas y también la correspondiente a los AF (Tablas 5.19 y 5.23). La fracción soluble en álcali y no precipitada por ácido puede contener una importante proporción de polisacáridos (Stevenson 1994). Estos efectos pueden atribuirse conjuntamente a las enmiendas y a la actividad de las lombrices, que han incorporado de manera más eficiente el material de la composta a la fracción huminas del suelo, agregando sus propias secreciones.

Del examen de los espectros al infrarrojo se puede concluir lo siguiente:

- a) Como resultado del composteo de la cascarilla se obtiene un producto enriquecido con derivados de lignina, y con proteína y otros compuestos nitrogenados; sin embargo, la humificación se limita a la conservación selectiva de proteína microbiana y quinonas.
- b) La actividad de las lombrices sobre la composta de cascarilla de cacao en el suelo resulta en compuestos orgánicos con contenido más elevado en grupos relacionados con la humificación y relativamente más estables, que son adecuados para mejorar ciertas propiedades del suelo.
- c) Al aplicarse a un suelo con abundante materia orgánica, bajo cultivo con maíz, la vermicomposta parece favorecer la actividad de los

microorganismos y con ello también la mineralización —incluyendo la de sus compuestos nitrogenados, cuyos nutrientes son aprovechados por las plantas— al tiempo que aporta compuestos con mayor aromaticidad, resultando en un mejoramiento neto de la fertilidad.

- d) El tratamiento de la cascarilla mediante composteo hasta su maduración, y su posterior mezcla con el suelo por lombrices, da lugar a un producto que mejora el rendimiento y la productividad de cultivos de maíz.

Cambios en los compuestos nitrogenados.

El nitrógeno total en estos suelos varía entre 2.1 y 6.8 g por kg de suelo (Tabla 5.24). Como era de esperarse, la composta contiene una proporción de nitrógeno mayor que la cascarilla. En el suelo Tsin, la adición de cascarilla (Tcas) produce aumento en el carbono total (17 a 20) pero hace disminuir el nitrógeno (3 a 2); la adición de composta resulta en aumento considerable del carbono (17 a 38) y a la vez incrementa el nitrógeno total (3 a 6). En el suelo R, la adición de vermicomposta da lugar a una pequeña disminución en el N total (6.3 a 6.1). El N total disminuye más en el terreno con enmienda de cascarilla (un $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ menos), que bajo el cultivo de maíz ($0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ menos), y así en el terreno T la relación C/N casi se duplica (factor 1.8) mientras en el terreno R se reduce (factor 0.7): la vermicomposta da lugar a un contenido mayor de N en la materia orgánica del suelo.

Los contenidos de N en suelos tropicales varían ampliamente: Kowalenko (1978) muestra datos de 0.27% para suelos de la India o 0.12% para suelos de Brasil; Fassbender *et al.* (1994) muestran valores desde 0.06% hasta 0.23% en el horizonte A de suelos no cultivados, y aún hasta 0.70% en los suelos cultivados de la región del Amazonas. Artículos más recientes reportan desde 0.089 hasta 0.365 % en 16 suelos distintos de Sri Lanka (Nandasena, 2000), ó 0.104 % en planicies de inundación en el delta del río Okavango en Botswana (Mubyana-John *et al.* 2007). Como ocurrió en los experimentos aquí reportados, el nitrógeno total de los suelos aumenta por adición de abonos, o tras la adición de fertilizantes, y disminuye cuando se mineraliza (se volatiliza o se lixivia) o cuando es absorbido

por las plantas. En los terrenos utilizados en este trabajo, el Fluvisol Éútrico T y el Acrisol húmico R, los contenidos de nitrógeno son bastante elevados, entre 0.21 y hasta 0.68 %, ya que son suelos manejados para agricultura.

Tabla 5.24 – Contenidos de carbono orgánico total (COT) y nitrógeno en los materiales y suelos.

	COT g · kg ⁻¹	N total g · kg ⁻¹	C/N
Cascarilla	546.0	51.5	10.6
Composta	443.0	89.0	4.98
T sin	17.2	3.2	5.37
T cas	20.3	2.1	9.67
T com	38.3	6.8	5.63
Rsin	89.7	6.3	14.24
Rcon	63.3	6.1	10.38

Las proporciones C/N nos permiten deducir algunos aspectos de la utilización de la materia orgánica por los microorganismos (ver Tabla 5.24). Paul y Clark (1966) señalan que se ha demostrado de manera experimental que la descomposición de residuos de cultivos con una proporción C/N de 25 resulta en que la mineralización y la inmovilización están balanceadas; si la proporción de carbono es mayor los microorganismos tomarán el nitrógeno mineral que haya, o bien la degradación se reduce hasta que muere parte de la población microbiana o hasta que el ataque a la materia orgánica del suelo (cuya proporción general de C/N es del orden de 10) da lugar a que haya nuevo nitrógeno disponible. Una proporción C/N baja puede estar condicionada por el consumo de los carbohidratos de la materia orgánica y el aumento consecuente de microorganismos (cuya proporción C/N es entre 5 y 8). En este experimento, aunque en Tcom el carbono y el nitrógeno están en poco más del doble de Tsin, el suelo T sin enmienda presenta una proporción C/N más reducida que con enmienda de cascarilla (Tcas) o de composta (Tcom), y en Tcom ese valor vuelve a ser semejante al del suelo sin tratamiento Tsin: hay más compuestos orgánicos

nitrogenados, probablemente como resultado del consumo microbiano de los carbohidratos y de la reproducción microbiana.

En el suelo R la enmienda produce disminución notable de la materia orgánica (casi $26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) mientras el contenido de nitrógeno prácticamente no disminuye ($6.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ en Rs, 6.1 en Rv), lo cual puede indicar también producción microbiana (proteína) a partir de los carbohidratos. A juzgar por la elevada proporción de nitrógeno en el suelo Rv, comparable a la de bacterias (Paul y Clark 1996), la vermicomposta parece estimular el crecimiento bacteriano, dando lugar también a la presencia de grupos nitrogenados que revelan los espectros IR (Fig. 8.23, $-\text{CONH}_2$). De los grupos nitrogenados sólo son mayores en Rv los grupos imino de AH o amidas II de AF (fig. 5.24, véase la Tabla 5.26). Algunas hipótesis proponen que las huminas pueden contener compuestos cíclicos nitrogenados formados por los hongos (Herrera y Ulloa 1990; Dorado *et al.* 2001) desarrollados durante el composteo de la cascarilla, y productos nitrogenados de las lombrices, principalmente aminoazúcares (Mora *et al.*, 2003) que son fácilmente degradables.

Al comparar los contenidos en nitrógeno total de los suelos, la cascarilla y su composta, contra los manifestados por los grupos nitrogenados, se puede también definir si los grupos que aportan el nitrógeno determinado como total son aquellos que podemos asociar con la humificación. Los espectros infrarrojos pueden mostrar la presencia de grupos nitrogenados: amidas, que se manifiestan por la presencia de hombros a 1660 cm^{-1} (amidas I), a $1550\text{--}1540 \text{ cm}^{-1}$ (amidas II), y a 1240 cm^{-1} (amidas III).

En la Tabla 5.25 puede notarse lo siguiente: aunque la composta presenta mayor contenido de nitrógeno total que la cascarilla, presenta menor absorbancia en las longitudes de onda que corresponden a los grupos nitrogenados. En el terreno T (Anacleto Canabal, vermicomposteo) el terreno tratado con cascarilla Tcas presenta el más bajo contenido en nitrógeno total, pero su espectro muestra mas grupos nitrogenados “amidas I”, “amidas II” y “amidas III” que el suelo T sin tratamiento; el tratado con composta

Tcom presenta un mayor contenido en nitrógeno total y en amidas I (1660 cm^{-1}). En el terreno R en el cual se cultivó maíz, los grupos nitrogenados y el nitrógeno total son menores en el suelo al cual se adicionó vermicomposta, Rv; los elevados contenidos de nitrógeno y de grupos nitrogenados en este suelo pueden estar asociados con la presencia inicial de los árboles de la leguminosa *Gmelina arborea* utilizados para el sombreado de los plantíos de flores, y el nitrógeno aportado por el suelo a las plantas resulta en buen rendimiento del maíz. Sin embargo el nitrógeno disminuye en proporción mucho menor que el carbono, lo que nos indica de nuevo la incorporación microbiana del N conjuntamente con la incorporación de MO nitrogenada a las fracciones de huminas y de AF.

Tabla 5.25 - Nitrógeno total y absorbancia de los AH al infrarrojo ($\text{UA}\times 10^4$; fracción de los grupos nitrogenados) de los suelos y materiales.

cm^{-1}	Cas-carilla	Com-posta	Tsin	Tcas	Tcom	Rs	Rv
N total, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	51.5	89.0	3.2	2.1	6.8	6.3	6.1
1660 cm^{-1} amidas I	9431	9403	8618	9231	9264	9312	8266
$1550\text{--}1540\text{ cm}^{-1}$, amidas II	6937	6567	6990	7608	6829	8238	7347
1240 cm^{-1} amidas III	6136	4097	6110	6737	5907	7151	6418

En cuanto al contenido de grupos nitrogenados en los compuestos orgánicos extraíbles como ácidos fúlvicos, los valores encontrados se muestran en la Tabla 5.26. En esta fracción la composta muestra contenidos claramente menores que la cascarilla excepto en 1660 cm^{-1} (amidas I). El terreno T con cascarilla Tcas sólo presentó mayor contenido en amidas I (a 1660 cm^{-1}), mientras que con composta aumentaron los contenidos en amidas I y en amidas II, a pesar de que en el suelo sin enmienda el nitrógeno total es mayor. El incremento en el contenido de nitrógeno, tanto en la composta como en los suelos con enmienda de composta Tcom y Rv, puede atribuirse a la proteína de los microorganismos (Paul y Clark 1996).

Tabla 5.26 – Nitrógeno total de los materiales y de los suelos, comparados con la intensidad ($UA \times 10^4$) de las bandas en los espectros infrarrojos (en fracciones de AF) de los grupos nitrogenados.

cm ⁻¹	Cas-carilla	Com-posta	Tsin	Tcas	Tcom	Rs	Rv
N total, g·kg ⁻¹	51.5	89.0	3.2	2.1	6.8	6.3	6.1
1660 amidas I	9431	9408	7647	8941	8576	8203	8402
1550-1540 amidas II	6937	5921	4824	4233	5687	5625	5665
1240 amidas III	6136	3420	3593	3556	3549	3838	3805

En el terreno R, esta fracción muestra que aunque el nitrógeno total fue menor en el terreno con vermicomposta, ésta aportó nitrógeno de grupos amidas II. Así, puede concluirse que la composta de cascarilla, aunque presenta menores contenidos en grupos nitrogenados que la cascarilla, contribuye a aumentar en los suelos la proporción de nitrógeno a través de la persistencia de ciertos grupos nitrogenados, ligeramente más resistentes a la degradación (Paul y Clark, 1996; Rovira y Ramón-Vallejo, 2002); y que la vermicomposta, aunque acelera la degradación de la materia orgánica en el suelo R (Acrisol húmico), favorece la presencia de compuestos nitrogenados.

5.13 – Análisis de las fracciones húmicas (método Kononova) mediante espectrofotometría de luz visible (absorbancia 700 a 400 nm).

Se presentan en la Tabla 5.27 las lecturas de absorbancia en las longitudes de onda de 726 nm, 668 nm, 619 nm, 574 nm, 530 nm, 486 nm, 465 nm, 420 nm, sobre la fracción poco coloreada del extracto con AH de cada material (cascarilla “Kas”, composta de cascarilla “Com”, y suelos Tsin, Tcas, Tcom, Rs y Rv), y la relación entre las densidades ópticas a 465 nm (E_4) correspondiente a la aromaticidad, y a 665 nm (E_6) que corresponde a la polidispersión.

La espectrofotometría en luz visible (Figura 5.25) muestra que el suelo con composta Tcom presenta la relación E_4/E_6 más baja, y las absorbancias a 465 y a 665 nanómetros también son también las más bajas indicando que ha disminuido

principalmente su contenido en derivados de ligninas (o aromaticidad) mientras la polidispersidad ha cambiado muy poco.

El valor de E_4 , el de E_6 , y también la relación E_4/E_6 , son más elevados en el suelo con vermicomposta Rv frente a los del suelo sin vermicomposta Rs. Tal condición puede presentarse cuando el contenido en compuestos aromáticos es mayor, y cuando los compuestos incorporados son recientes (Stevenson, 1994); la enmienda aplicada al suelo Rc cumple ambas condiciones. Pero aún confirma las tendencias encontradas con los espectrogramaspectros IR: es mayor el grado de humificación en el suelo R con vermicomposta.

Tabla 5.27 Absorbancia en el espectro de luz visible de los AH.

	nm								E4/E6
	420	465	486	530	574	619	665	726	
Kas	0.148	0.122	0.116	0.101	0.093	0.084	0.080	0.083	1.525
Com	0.193	0.141	0.128	0.105	0.093	0.085	0.079	0.078	1.785
Tsin	0.088	0.079	0.079	0.074	0.072	0.067	0.066	0.068	1.162
Tcas	0.120	0.119	0.110	0.105	0.105	0.107	0.095	0.097	1.253
Tcom	0.077	0.073	0.072	0.069	0.068	0.065	0.065	0.072	1.123
Rs	0.085	0.075	0.074	0.069	0.067	0.063	0.061	0.065	1.230
Rv	0.115	0.101	0.099	0.091	0.087	0.083	0.080	0.082	1.263

Una relación E_4/E_6 más alta puede indicar (Schnitzer y Kahn 1972; Martin *et al.* 1998; Conte y Piccolo 1999; Piccolo 2001):

a) que la condensación de constituyentes húmicos aromáticos es menor, están menos polimerizados, presentan menor tamaño y peso molecular

b) que hay mayor proporción de estructuras alifáticas,

c) que los contenidos de oxígeno y carboxilos son mayores.

La relación E_4/E_6 en la fracción húmica de los distintos suelos y materiales puede compararse así: Com > Kas > Rv > Tk > Rs > Ts > Tc. Es más alta en la composta que en la cascarilla al aumentar el grado de oxidación, mientras la polidispersión (absorbancia a 665, E_6) no resultó distinta tras el composteo: la

lignina y los fenoles que derivan de ésta —y dan lugar a sustancias de color pardo por oxidación— resisten más a la biodegradación (Paul y Clark 1996) durante el composteo en pila.

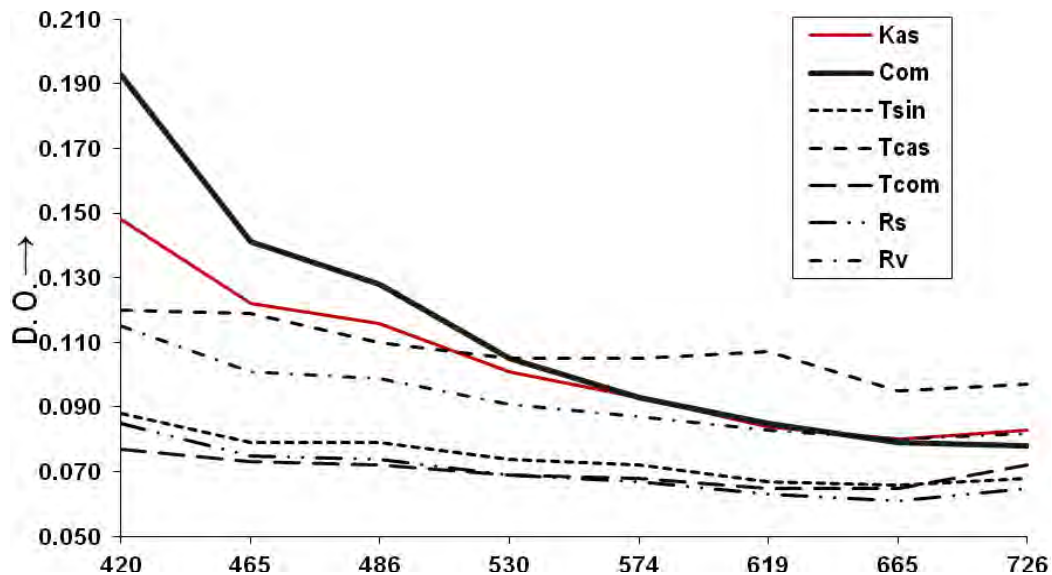


Fig. 5.25 – Espectros VIS (absorbancia a la luz visible).

En el suelo con composta Tc se encontró la relación E_4/E_6 más baja, y las absorbancias a 465 y a 665 nanómetros son también las más bajas del conjunto T (suelo empleado en el vermicomposteo, T sin tratamiento, con cascarilla, con composta): ha disminuido principalmente su contenido en derivados de ligninas (o aromaticidad) mientras la polidispersión es casi la misma. Los espectros IR del conjunto Ts-Tk-Tc muestran que hay mayor contenido de fenoles o quinonas en el suelo tratado con cascarilla y le sigue el tratado con composta (ambos con mayor contenido que el suelo testigo), pero también hay mayor contenido de carboxilos y otros grupos que podrían ser productos de oxidación de los grupos fenólicos de ligninas.

En el terreno R en que se cultivó maíz, el suelo Rv con vermicomposta presenta una relación E_4/E_6 más alta que la del suelo sin tratamiento Rs, lo cual puede ser consecuencia de la adición de composta (resulta en sustancias húmicas menos polimerizadas y más oxidadas, de acuerdo con Schnitzer y Khan 1978).

Finalmente, las distintas técnicas muestran que el manejo que puede producir buenos resultados en el uso de la cascarilla de cacao es:

- a) el composteo en pila, primero,
- b) posteriormente su incorporación con lombrices a material de suelo en capa delgada, mejorando los contenidos de carbono orgánico y de nitrógeno en el suelo tratado, junto con otras propiedades del mismo; y
- c) aplicar, como enmienda, una pequeña porción de ese suelo tratado al punto en que se siembra.

En cuanto a los costos, el procedimiento es poco redituable si se contempla la producción de lombrices o la producción de un cultivo comercial como el maíz. Sin embargo, debe explorarse el efecto de su aplicación a cultivos redituables (y aún para mejorar suelos deteriorados), para lo cual es recomendable desarrollar otros experimentos.

CONCLUSIONES

La cascarilla de cacao utilizada presentó, frente a la cascarilla de otras regiones (Minifie 1989, Abbiola y Tewe 1991), elevado contenido de cenizas (23% frente a la media de 12%), COT (24%, media 15%) y grasas (5.1%, media 1%), y contenidos bajos de fibra cruda (17 frente a 43%), y nitrógeno (1.5 %, media 2.4%): constituye una enmienda con buen contenido de nutrientes, pero con elevado contenido de grasas.

Respecto a los efectos del extracto de cascarilla sobre maíz, dosis de 500 $\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ (5 g de cascarilla por dm^{-3} de agua) o 600 $\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ se tradujeron en incrementos en la altura, el número de hojas y el rendimiento.

La composta de cascarilla presentó un rendimiento de 68%, con un peso por unidad de volumen (DA) 1.28 veces mayor que la cascarilla, un contenido de carbono 1.44 veces mayor y de nitrógeno 1.16 veces mayor. Así, la proporción C/N, fue 15.97 en la cascarilla, y en la composta fue mayor, 19.8. Experimentó cambios favorables que se reflejan en el rendimiento del composteo.

La cascarilla agregada al suelo como enmienda (2070 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ o 1380 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), mejora varias de sus propiedades: aumenta el contenido de carbono orgánico en un factor de 1.3, la capacidad de intercambio catiónico en un factor de 1.2, eleva el pH en más de una unidad, y disminuye la densidad aparente en una décima.

Los experimentos en maceta con lombrices muestran que éstas pueden trabajar la cascarilla, incorporándola como materia orgánica del suelo (la cual sufre un aumento significativo, $r^2 = 0.671$, $P < 0.35$), produciendo que la retención de humedad aumente ($r^2 = 0.968$) y que la densidad aparente disminuya ($r^2 = -0.74$, $P < 0.35$). Y muestran también que la cascarilla puede favorecer el desarrollo de lombrices en el suelo.

Los experimentos de vermicomposteo en capa delgada en un Fluvisol muestran que la adición de cascarilla resulta favorable para las lombrices, y ciertas dosis indican la posibilidad de obtener más lombrices: 700 $\cdot \text{m}^{-2}$ con 1840 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ de cascarilla, 600 $\cdot \text{m}^{-2}$ con 1150 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$. Las dosis de 690 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ y 1840 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,

mejoran las propiedades del suelo a la vez que favorecen el desarrollo de las lombrices.

Los experimentos en campo señalan una dosis óptima de $1080 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de cascarilla, que da lugar a la producción de $58.3 \text{ lombrices}\cdot\text{m}^{-2}$ (promedio) en poco más de dos meses. Sin embargo, esta producción es inferior a los $83 \text{ organismos}\cdot\text{m}^{-2}$ encontrados en el cacaotal de origen. Las sustancias que contiene la cascarilla tostada no son favorables para las lombrices.

La adición de composta al suelo ocasionó aumentos significativos en el contenido de carbono orgánico, en la capacidad de intercambio catiónico, y disminución en la densidad aparente; el contenido de nitrógeno disminuyó con la cascarilla (aumentando la relación C/N 1.8 veces), y aumentó con la composta (desde $3 \text{ a } 7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de N, acercando la relación C/N a la del suelo sin enmienda). Como medio de desarrollo de las lombrices, la composta ($920 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) mostró efectos más favorables en el aumento de su número ya que da lugar a la producción de $300 \text{ lombrices}\cdot\text{m}^{-2}$ (30 veces más).

La adición de cascarilla al suelo T (Fluvisol éutrico) incrementa la fracción de ácidos fúlvicos coloreados (AFpvp), mientras que la adición de composta incrementa el carbono orgánico total y disminuye la proporción de las fracciones húmicas. Los resultados del método Dabin indican que el tratamiento con cascarilla en este suelo aumenta tanto el COT, como la fracción AH y el carbono extraíble de la fracción MO libre, mientras que la aplicación de composta produce incrementos en el COT, y en todas las fracciones de la MO del suelo. Los espectros IR muestran la presencia de metoxilos —asociados a la lignina y que son más abundantes en los ácidos húmicos menos maduros.

La adición de vermicomposta en el suelo R (Acrisol húmico) da lugar a la disminución en la materia orgánica del suelo, mientras incrementa sus fracciones AF y huminas.

Las fracciones de AH y AF en el suelo tratado con vermicomposta sugieren que el aumento en la calidad del suelo depende de aquellas fracciones *neoformadas*.

Los espectros IR muestran que la cascarilla y la composta de cascarilla agregadas al suelo T aportan material orgánico que favorece la actividad microbiana, mejorando la aromaticidad y la proporción de grupos funcionales ácidos; en suma, que se favorece la humificación.

Y muestran que la adición de vermicomposta en el terreno R acelera la degradación en la mayoría de las distintas fracciones de la materia orgánica del suelo, con la preservación selectiva de grupos funcionales ácido ($1725-1720\text{ cm}^{-1}$) y amidas ($1660-1630$, 1540 cm^{-1}) de proteína. En conjunto, los espectros IR señalan que hay mejoras en los indicadores de humificación de las distintas fracciones del suelo T como resultado del vermicomposteo.

Por otro lado, el ambiente mejor aireado del suelo R (situado en la parte alta de un lomerío, no inundable) favorece la presencia de compuestos más oxidados.

Puede concluirse entonces que el OBJETIVO GENERAL, la transformación de la cascarilla de cacao a un sustrato mejorador de suelos semejante al humus, se refleja en el aumento de la fracción de huminas asociada a las arcillas y en el incremento de la fracción de ácidos fúlvicos en la materia orgánica del suelo, tanto en el tratado con cascarilla y trabajado por lombrices, como en el tratado con composta y trabajado por lombrices. Los contenidos ligeramente mayores de grupos nitrogenados en la fracción húmica encontrados pueden ser producto de la actividad de las lombrices o de los microorganismos asociados a éstas.

Respecto a los objetivos particulares, se definió lo siguiente:

- a) la cascarilla mejora en los suelos su contenido de materia orgánica y las propiedades asociadas a ésta: capacidad de retención de humedad, densidad aparente, y en menor medida la capacidad de intercambio catiónico. El composteo aumenta su calidad como enmienda.
- b) puede lograrse el aumento en la presencia de grupos químicos relacionados con la humificación al compostar la cascarilla, y la formación de complejos arcilla-humus o huminas mediante el trabajo que las lombrices realizan con suelo y cascarilla, o con suelo y composta de cascarilla. La composta y la

vermicomposta enriquecen la fracción AF y la fracción huminas, como se esperaba.

Los procedimientos para convertir la cascarilla en humus dependen del objetivo: es económico y provechoso el composteo de la cascarilla en capa delgada con lombrices, pero no resulta redituable producir lombrices alimentándolas con cascarilla de cacao o con composta de cascarilla de cacao.

APENDICE VII a – resultados del vermicomposteo en maceta y sus correlaciones

Tabla anexa VII a – resultados, lombricomposteo de cascarilla en macetas.

Cuba n°	Peso inicial suelo + cascarilla	Peso final húmedo	Peso final seco	Cober-tura con casca-rilla %	Densidad aparente g·cm ⁻³	Materia orgánica, g·kg ⁻¹	CIC cmol _(c) ·kg ⁻¹	Lombrices, número final	Humedad retenida, % en peso
1	1000.0	959.6	801.8	0	0.98	11.6	39.4	3	16.44
2	1000.0	959.4	785.6	0	0.98	13.2	40.5	0	18.00
3	1015.8	1089.6	825.1	20	0.91	13.7	38.9	4	24.27
4	1015.8	1089.4	803.9	20	0.94	13.3	39.4	2	26.21
5	1023.7	1114.5	842.4	30	0.90	12.7	44.4	4	24.41
6	1023.7	1013.3	810.3	30	0.91	12.7	45.5	5	20.03
7	1031.6	1129.0	830.0	40	0.91	14.5	40.0	4	26.48
8	1031.6	1042.2	816.0	40	0.93	14.5	40.5	0	21.70
9	1039.5	1188.9	892.4	50	0.86	15.5	39.4	6	24.94
10	1039.5	1102.0	931.4	50	0.89	13.4	40.5	0	15.48
11	1047.5	1207.4	917.2	60	0.90	14.7	43.8	3	24.03
12	1047.5	1045.4	862.6	60	0.95	15.3	42.2	5	17.45
13	1055.4	1221.0	885.4	70	0.89	14.2	41.1	4	27.48
14	1055.4	1066.6	868.1	70	0.89	14.2	40.0	0	18.61
15	1063.3	1228.4	886.7	80	0.88	14.3	41.6	7	27.81
16	1063.3	1094.9	891.8	80	0.90	14.7	48.8	0	18.55
17	1071.2	1250.1	883.0	90	0.86	16.5	42.7	1	29.36
18	1071.2	1116.5	895.4	90	0.86	15.3	40.5	1	19.80
19	1079.1	1311.3	901.3	100	0.89	14.0	44.4	4	31.27
20	1079.1	1081.1	871.7	100	0.89	14.5	42.7	0	19.37
Correlación con el peso inicial		0.968	0.831	0.999	-0.737	0.671	0.429	0.021	0.948

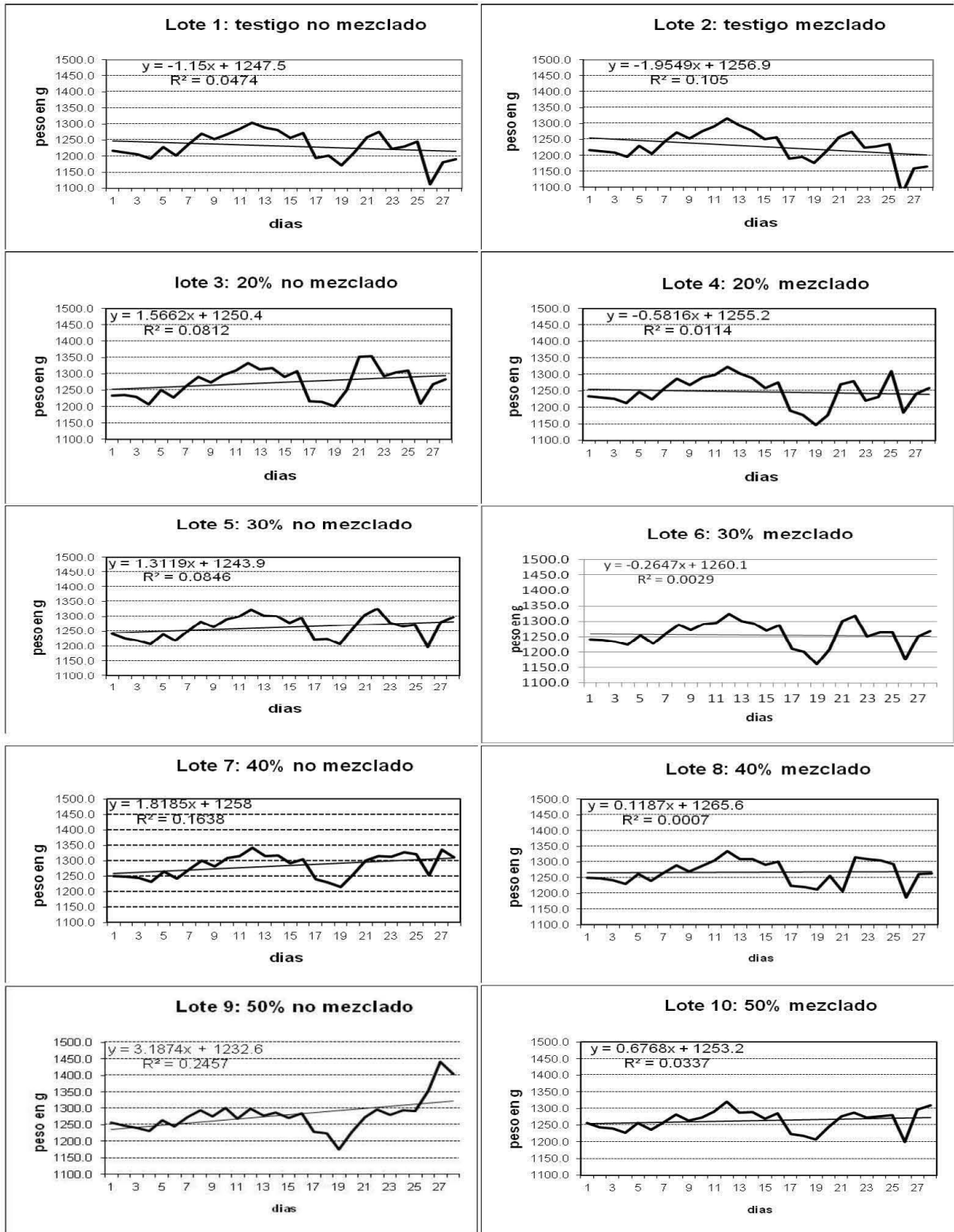
Tabla anexa VII a, 2a – Correlaciones (r^2) entre resultados del vermicomposteo en maceta

No mezcladas	Peso final húmedo	Peso final seco	Coertura cascarilla	DA	Materia orgánica	CIC	Lombrices, número final	Humedad
Peso inicial	0.669	0.771	0.999*	-0.739	0.683	0.390	-0.083	0.294
Peso final húmedo		0.694	0.669	-0.728	0.531	0.187	0.345	0.815*
Peso final seco			0.771	-0.743	0.543	0.282	0.011	0.151
Cobertura cascarilla				-0.740	0.683*	0.390	-0.083	0.294
Densidad Aparente					-0.607	-0.181	-0.105	-0.427
materia orgánica						0.074	-0.054	0.308
CICT							-0.030	0.021
Lombrices nº final								0.465

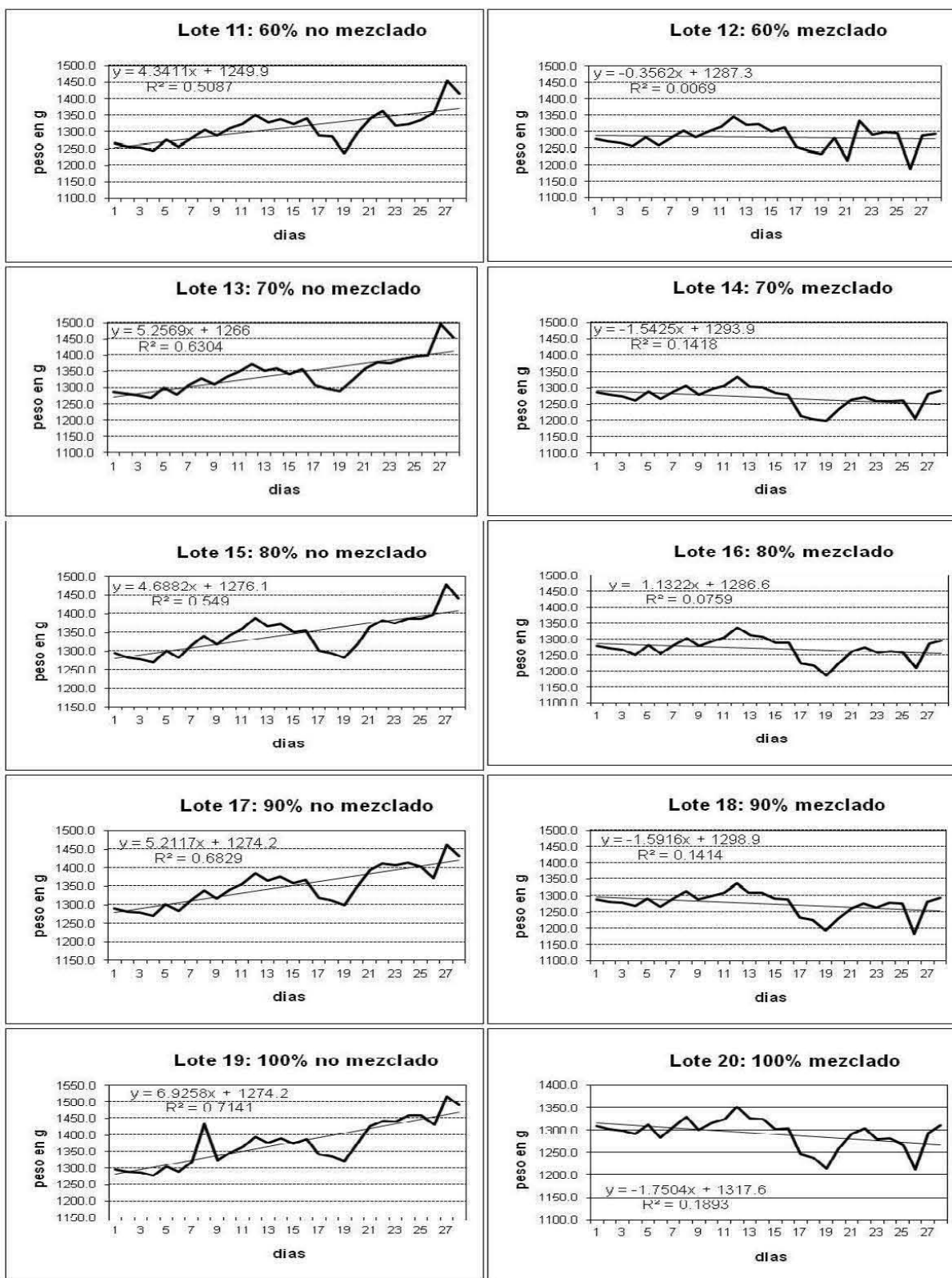
* $P < 0.05$

Mezcladas	Peso final húmedo	Peso final seco	Coertura cascarilla	DA	Materia orgánica	CIC	Lombrices, número final	Humedad
Peso inicial	0.729	0.747	0.999*	-0.783	0.733	0.277	-0.205	-0.070
Peso final húmedo		0.884	0.697	-0.768	0.452	0.019	-0.233	0.351
Peso final seco			0.748	-0.744	0.475	0.159	-0.262	-0.346
Cobertura cascarilla				-0.784	0.733*	0.277	-0.205	-0.07
DA					-0.319	-0.152	0.239	-0.036
materia orgánica						0.065	-0.091	-0.031
CICT							0.201	-0.200
Lombrices nº final								0.041

Apéndice VII b. Vermicomposteo de cascarilla en lotes (macetas) con distintas dosis: evolución del peso en el tiempo y su tendencia, gráficas por lote



Apendice 6b. continúa



Apendice VII c. Definición de la categoría del suelo bajo el cacaotal en Puyacatengo, según la Soil Taxonomy.

Siguiendo las Claves para la Taxonomía de Suelos (SMCS 1995), el material de suelo mineral puede estar saturado con agua por periodos prolongados y, excluyendo a las raíces vivas, tiene un contenido de carbono orgánico (por peso) menor a 12.91 % (12 % más el porcentaje de arcilla en el horizonte superficial Ah, que multiplicado por 0.1 resulta en 0.909 %) cuando la fracción mineral contiene menos de 60% de arcilla: 4.9 % de COT es menor a 12.9 %.

Se puede considerar horizonte antrópico, Ap, al horizonte superficial. Para ello debe ajustarse a “todos los requisitos del epipedón mólico... excepto para: (1) los límites de P_2O_5 soluble en ácido, con o sin saturación de bases” –no se usa fertilizante en este cacaotal–; “o (2) la duración de la humedad disponible” –el cacaotal se encuentra en las estribaciones de la Sierra Madrigal, con una precipitación pluvial (media anual) de 3,862.6 mm, entre las más elevadas del mundo: puede definirse que la humedad disponible es alta y está presente todo el año.

Como **epipedón mólico** se define: “...consiste de suelo mineral y está en la superficie, a menos que esté debajo... de una capa delgada de material de suelo orgánico... (y) tiene las siguientes propiedades:

“1. La estructura del suelo es suficientemente fuerte para que la mitad o más del horizonte no sea duro, muy duro o durísimo y masivo cuando seco, incluyendo prismas muy gruesos con diámetro de 30 cm o más si no existe estructura secundaria dentro de los prismas.” **Cumple**

“2. A menos que la fracción de tierra fina tenga 15% o más de carbonato de calcio equivalente...” (**no hay carbonato de calcio en todo el perfil, pues la reacción al HCl fue nula**) “...las muestras molidas tienen en la escala de Munsell un valor de color (value) de 3 o menos cuando húmedo” (**en este suelo todas presentan valor de 4 o mayor: NO CUMPLE**)... “y de 5 o menos cuando seco”... (se cumple)... “y un croma de 3 o menos”... (el Ahp tiene un croma de 3)... “El epipedón mólico deberá tener un color cuya intensidad o cuyo croma son más bajos que en el horizonte 1C”... (en este caso, una unidad del croma en húmedo, una unidad del valor en seco)... “Se obvia si... el horizonte superficial... tiene al menos 0.6% más de carbono orgánico que el horizonte 1C”... si se toma en cuenta el horizonte de 71 a 129 cm, que presenta 1.45 % de COT, el A1 presenta 2.36 % de COT, una diferencia de 0.91 % y **cumple con el requisito de 0.6% más.**

“4. El contenido de **carbono orgánico** es, ya sea 0.6% o más a través del espesor del epipedón mólico, o 2.5% o más en las capas que tienen un color cuya intensidad en húmedo es de 4 o 5, y la fracción de tierra fina presenta 40% o más de carbonato de calcio equivalente...”

“5. Después de mezclados los 18 cm superiores del suelo mineral,... el espesor del epipedón es como sigue:

- a. 10 cm o más si el epipedón está directamente encima de un contacto lítico (**se cumple**)
- b. 25 cm o más si ya sea: (1) la textura del epipedón es arena francosa fina o más gruesa en todo su espesor (**los horizontes Ah, A1 y A2 abarcan 40 cm, con textura franca**); o (2) no existen horizontes de diagnóstico subyacentes... (**en este caso se propone el subyacente B2 como horizonte argílico: sí hay horizonte diferenciado para su diagnóstico**)...y el contenido de carbono orgánico de los materiales subyacentes decrece irregularmente con el

incremento de la profundidad –como en depósitos aluviales recientes- (**cumple: Ah 4.9%, A1 2.36%, A2 2.63%, B1 2.18%, B2 1.99%**).

c. 25 cm o más si el epipedón es más fino que la arena francosa fina (**se cumple**) y si todo lo siguiente está a 75 cm o más debajo de la superficie del suelo mineral:

(1) el límite superior de cualquier caliza pedogenética... (**se cumple**)

(2) el límite inferior de cualquier horizonte argílico...” Hemos definido que puede calificarse como horizonte argílico al B2, cuyo límite inferior está a 71 cm: **NO CUMPLE.**

En resumen: no puede afirmarse que el horizonte Ah sea semejante a un horizonte mólico, para calificarlo como antrópico.

Otra propuesta es la de considerarlo **epipedón Ocrico**: “...no reúne los requisitos de las definiciones para cualquiera de los otros 6 epipedones porque es muy delgado, o muy seco, **tiene un color con valor o croma muy elevados**, contiene muy poca materia orgánica o tiene valores muy altos de **n**, o del índice melánico, o es muy duro y masivo cuando seco... una intensidad en la escala Munsell de 4 o más cuando húmedo y 6 o más cuando secos **o un croma de 4 o más**, o incluye a un horizonte A o un Ap que tiene un color cuya intensidad y cuyo croma son bajos pero es muy delgado (como el **Ahp** que nos ocupa: **15 cm**) para ser reconocido como epipedón mólico o úmbrico, y tiene menos de 15% de carbonato de calcio equivalente en la fracción de tierra fina (**lo cual en este caso se infiere de la reacción nula al HCl**).

“Incluye horizontes eluviales que están en o cerca de la superficie...” (cada uno de los estudiados puede ser considerado eluvial: la DA y la proporción de arcilla aumentan con la profundidad)

“...y se extiende hasta el primer horizonte de diagnóstico iluvial subyacente (definidos más adelante como un horizonte árgico, un kándico, un nátrico o un espódico). Si el horizonte subyacente es un B de alteración (cámbico u óxico) y no existe un horizonte superficial que esté apreciablemente oscurecido por el humus, el límite inferior del epipedión ócrico es el límite de la capa arable o una profundidad equivalente en un suelo que no ha sido trabajado. En un suelo no laboreado, el mismo horizonte puede ser en una parte epipedión y en otra endopedión —el horizonte cámbico; el epipedión ócrico y los horizontes de diagnóstico subsuperficiales no son mutuamente excluyentes. El epipedión ócrico no tiene estructura de roca y no incluye a sedimentos recientes finamente estratificados.”

En resumen, **es aceptable la definición como Epipedión ócrico.**

Por otra parte: el horizonte **kándico** es “(1) un horizonte subsuperficial verticalmente continuo que subyace a un horizonte superficial de textura gruesa (ver tabla 8.2: el Ah presenta 49.1% de arena y 41.8% de limo; el A1, 49% arena y 38% limo; el A2, 45.5% arena y 38% limo; el B1, 45.5% arena y 36% limo; el B2 en cambio presenta sólo 29.6% de arena, 42% de limo y más del doble de arcilla que el A1). “El espesor mínimo del horizonte superficial es 18 cm después de mezclado (en cacaotales el suelo no se mezcla) o 5 cm si la transición al horizonte kándico es abrupta y no existe un contacto lítico... o petroférico... dentro de 50 cm de la superficie (el horizonte C se encuentra a 71 cm: **sí CUMPLE**).

(2) Tiene su límite superior:

a) en el punto en el cual el porcentaje de arcilla en la fracción de tierra fina se incrementa con la profundidad, dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, ya sea que:

- 1) presente un porcentaje mayor en 4% o más que el del horizonte superficial si aquel horizonte tiene menos de 20% de arcilla total en la fracción de tierra fina (se considera que el kándico es el horizonte B2, de modo que **SÍ CUMPLE**)....
- b) a una profundidad (1) entre 100 cm y 200 cm de la superficie del suelo mineral, si la clase de tamaño de partícula en todos los 100 cm superiores es arenosa; o (2) a menos de 125 cm de la superficie del suelo mineral (**65 cm del horizonte B2 en este suelo**) si el contenido de arcilla en la fracción de tierra fina del horizonte superficial es menor que 20% (**9.09% en el suelo estudiado**) y la clase de tamaño de partícula (de parte o todos los 100 cm superiores) es más fina que arenosa (**LOS ES en el suelo estudiado, textura franca**).
- (3) Tiene un espesor de *ya sea*:
- 30 cm o más, o
 - 15 cm o más si existe contacto lítico o paralítico o petroférico dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral, donde el horizonte kándico constituye el 60% o más de la distancia vertical entre una profundidad de 18 cm y el contacto... **65 a 71 del horizonte B2 abarcan apenas 6 cm, que no cubren el 60% de la diferencia entre 18 cm a 71 cm: no cumple. Si se toman en conjunto los horizontes B1 y B2, que abarcan 31 cm, al comparar contra (71 – 18) 53 cm aún no alcanzan el 60%... NO CUMPLE. Los horizontes B1 y B2 tomados en conjunto como horizonte kándico tienen un espesor de 1 cm mayor que los 30 del requisito indicado en 3 a)...**
- (4) Tiene una textura de arena franca muy fina o más fina: **CUMPLE**.
- (5) Tiene una CIC de 16 cmol(+) o menos por kg de arcilla... **en todos los casos es mayor: NO CUMPLE**.
- (6) Tiene un decremento regular en el contenido de carbono orgánico con el incremento de la profundidad, sin estratificaciones finas y no hay capas suprayacentes de más de 30 cm de espesor que tienen una estratificación fina y cuyos contenidos de carbono orgánico decrecen irregularmente con el incremento de la profundidad”. **CUMPLE...**

En resumen: el propuesto como **HORIZONTE KÁNDICO** en realidad tiene menor espesor y presenta una CIC mayor a las definidas como requisito. **NO CUMPLE**.

El horizonte B2 podría considerarse **argílico**, de acuerdo con la Soil Taxonomy (1994):

“...puede haberse formado debajo de un horizonte eluvial... (en este caso el horizonte A2... y el B1)

..y “...cumple los siguientes requisitos:

- Si existe discontinuidad litológica... (no la hay)
- si un horizonte eluvial se conserva y no existe una discontinuidad litológica entre dicho horizonte y el horizonte argílico subyacente, el horizonte argílico contiene – dentro de los 30 cm a partir de su límite superior- porcentajes más altos de arcilla total y de arcilla fina que el horizonte eluvial, como sigue:
 - si en cualquier parte del horizonte eluvial suprayacente tiene menos del 15% de arcilla total en su fracción de tierra fina (cual es el caso del horizonte A1 en este suelo), el contenido de arcilla total en el horizonte argílico es más alto de un 3% o más (absoluto) que en el horizonte eluvial... En el caso que nos ocupa, el horizonte B2 presenta 28.2% de arcilla frente a 16.4 % del horizonte A2 o frente a 18.2% del horizonte B1: más de 11% en el primer caso o 10% en el segundo caso, **cumple**.

- b) si el horizonte eluvial suprayacente tiene de 15 a 40 % de arcilla total en la fracción de tierra fina... (aplicable a A2 y a B1)... el contenido de arcilla total en el horizonte argílico es mayor en 20% o más (relativo) que en el horizonte eluvial (por ejemplo, 24% contra 20%).” –en el suelo estudiado, el horizonte B2 presenta 28% frente a 18% del B1, 46% más en términos relativos, y **CUMPLE ESTE REQUISITO**. “La relación de arcilla fina a arcilla total en el horizonte argílico es normalmente mayor en un tercio o más que en el horizonte eluvial” –en el suelo estudiado, 28% en el B2 es una y media veces más arcilla que en el B1, mayor en un medio, mayor que un tercio.
- c) si el horizonte eluvial tiene de 40 a 60 % de arcilla total...” (no aplica)
- d) si el horizonte eluvial tiene 60% o más de arcilla...” (no aplica)
- “3. El espesor del horizonte argílico es un décimo o más del espesor de todos los horizontes suprayacentes”...B2 presenta 6 cm de espesor frente a 65 cm que suman los suprayacentes; **no cubre** este requisito...
- “...y *una* de las siguientes:
- a) 7.5 cm o más si el horizonte es francoso o arcilloso.” **NO LO CUMPLE**
- b) 15 cm o más si el horizonte es arena... (no aplica)
- c) Si el horizonte está compuesto enteramente por laminillas...” (no aplica)
- “4. En los suelos sin estructura...” (no aplica)
- “5. Si los agregados están presentes, el horizonte argílico tiene *una* de las siguientes:
- a) ya sean, películas de arcilla sobre algunas superficies verticales u horizontales de los agregados y en los poros finos, o arcilla orientada en un 1% o más de la sección transversal” (**e. d. cutanes...**) o
- b) un límite superior discontinuo o irregular y algunas películas de arcilla en la parte inferior del horizonte; o
- c) si el horizonte eluvial tiene 40% o más de arcilla...” (no aplica)
- d) No hay películas de arcilla si el horizonte argílico es arcilloso con arcillas del tipo 2:1 y si, ya sea que el horizonte suprayacente tiene granos de arena o limo no recubiertos, y el horizonte argílico muestra evidencias de presión causadas por expansión (por ejemplo, revestimientos arcillosos ocasionales o límites del horizonte ondulados), **o si la relación de arcilla fina a arcilla total en el horizonte argílico es mayor en un tercio o más que en el horizonte subyacente o suprayacente (CUMPLE), o si el contenido de arcilla fina en el horizonte argílico es 8% (absoluto) o más alto que en el horizonte eluvial (CUMPLE).**”

En resumen: el horizonte B2 podría ser considerado **argílico** excepto porque su espesor es menor al requerido.

Puede ser considerado **horizonte cámbico** ya que... “no tiene el color oscuro (cumple), el contenido de materia orgánica y la estructura de un epipedón místico (cumple: no los tiene), un mólico (cumple, no los presenta), o un úmbrico (no lo presenta), y tiene **todas las siguientes:**

- 1) una textura de arena muy fina, arena fangosa muy fina, o más fina (**cumple**)
- 2) una estructura de suelo, o ausencia de estructura de roca, en la mitad o más de su volumen (**cumple**)
- 3) evidencias de alteración en la forma, ya sea de:

a. condiciones ácuicas por algún tiempo en la mayoría de los años (o drenaje artificial) **–el cacaotal se encuentra en la falda del cerro Madrigal, región del segundo lugar más lluvioso del mundo–** y ambas de las siguientes:

(1) dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral... sobre las caras de los agregados... 50% o más del croma... (a) dos o menos y condiciones redox **(no aplica)**, (b) cero y un color del valor en húmedo de 3 o menos **(no aplica)**, (c) uno o menos y un valor del color húmedo de 3 o menos **(no aplica)**

b. ya sea que no muestra condiciones ácuicas (o drenaje artificial) o **colores diferentes a los definidos en 3. a**, o ambos y una o más de las siguientes:

(1) un **croma más alto**, un hue más rojizo o **mayores contenidos de arcilla que en el horizonte subyacente, CUMPLE** o

(2) **evidencias de remoción de carbonatos**, particularmente menos carbonatos que en el horizonte K subyacente (...si los fragmentos gruesos en el horizonte K están recubiertos sólo en el lado inferior, aquellos **en el horizonte cámbico están libres de recubrimientos**).

(3) **Si los carbonatos están ausentes en el material parental y en el polvo que cae sobre el suelo, el requisito de evidencia de alteración se satisface por la presencia de estructura de roca; y**

4. propiedades que no cumplen los requisitos para un horizonte argílico, un kándico, un óxico o un espódico **(como se ha mostrado: no cumple con el espesor para argílico, o kándico)**

5. no cementado o endurecido y no tiene consistencia quebradiza cuando húmedo.

6. un límite inferior a una profundidad de 25 cm o más a partir de la superficie del suelo... **(CUMPLE)**

En resumen: el horizonte B2 CUMPLE con requisitos para considerarle horizonte CÁMBICO.

Así, tenemos un suelo con horizonte superficial Ocrico y con un horizonte sub-superficial Cámbico. La clasificación propuesta es Arenic epiaqualf.

Bibliografía.

- Abbiola S., S., O. O. Tewe. 1991. Chemical evaluation of cocoa by-products. *Trop. Agric. (Trinidad)* 68: 335–336.
- Abbiola S. S., O. O. Tewe. 2003. Effect of replacing cocoa husk for wheat bran on internal organs, carcass yield, serum metabolite and economics of production of growing cockerels. *Nigerian Agric. J.* 34: 110–115.
- Adani, F. 2006. Soil Organic Matter: Stabilization and Carbon Sequestration. Proc. 18th World Congress of Soil Science 138: 2.2 A. Philadelphia, Pa. USA.
- Agroterra 2007. http://agroterra.com/web_pd, Agroterra.com Perú. <http://www.agroterra.com/web-pd/semilla-hibrida-maiz>
- Aguilera H., N. 1989. Tratado de Edafología de México. Ed. Facultad de Ciencias UNAM, México.
- Aiken, G. R., D. M. Mc Knight, R. L. Wershaw, P. MacCarthy. eds. 1985. Humic substances in soil, sediment, and water. Wiley. N. Y.
- Alemawor F., V. P. Dzogbefia, E. O. K. Oddoye, J. H. Oldham. 2009. Effect of *Pleurotus ostreatus* fermentation on cocoa pod husk composition: Influence of fermentation period and Mn²⁺ supplementation on the fermentation process. *African J. Biotechnol.* 8: 1950-1958.
- Almendros, G.; A. Polo, E. Dorado. 1979. Caracterización de las sustancias húmicas en la fracción húmica de los suelos. *An. Edafol. Agrobiol.* 38: 2001–2005.
- Almendros, G., J. Sanz. 1992. A structural study of alkyl polymers in soil after perborate degradation of humin. *Geoderma* 53: 79–95.
- Almendros G. 2008. Humic substances *in* Kluwer Encyclopedia of Soil Science. W. Chesworth Ed. Springer. p. 97–99.
- Alvim, P. de T. 1960. El problema del sombreamiento del cacao bajo el punto de vista fisiológico. VII Conferencia Interamericana del Cacao, pp 294–303.
- Alvim, P. de T., F. P. Cabala R. 1974. Um novo sistema de representação gráfica da fertilidade dos solos para cacau. *Cacau Atual (Brasil)* 11: 2–6.
- Alvim, T. y T. Koszowski (Editors) 1977. *Ecophysiology of tropical crops*. Academic Press, N. Y.
- Amir, S., M. Hafidi, G. Merlina, J. C. Revel. 2005. Structural changes in lipid-free humic acids during composting of sewage sludge. *Int. Biodet. Biodeg.* 55: 293-246
- Anaya, A. L. 1999. Allelopathy as a tool in the management of biotic resources in agroecosystems. *Critical Rev. Plant Sci.* 18: 697–739.
- Anderson, D. W., E. A. Paul, R. J. St. Arnaud. 1974. Extraction and characterization of humus with reference to clay-associated humus. *Can. J. Soil Sci.* 54: 317–323
- Anderson, H. A., J. D. Russell. 1976. Possible relationship between soil fulvic acid and polymaleic acid. *Nature* 260: 597.
- Anderson J. M., P. W. Flanagan. 1989. Biological processes regulating organic matter dynamics in tropical soils, cap. 4 *In*: D. C. Coleman, J. M. Oades, G. Uehara. Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. NiftAL project, University of Hawaii.
- Aneja, M., T. Gianfagna, E. Ng. 1996. Abscisic acid metabolism and episodic growth in cocoa. *PGR* 20: 209–214.

- Aniszewski, T. 2007. Alkaloids: secrets of life. Alkaloid chemistry, biological significance, applications and ecology. Elsevier, B. V. [doi:10.1016/B978-044452736-3/50002-7](https://doi.org/10.1016/B978-044452736-3/50002-7)
- Aregheore E. M. 2004. Chemical evaluation and digestibility of cocoa (*Theobroma cacao*) byproducts fed to goats. Trop. Anim. Health Prod. 34: 339–348
- ASA-SSSA. 1982. Methods of Soil Analysis, part 2. American Society of Agronomy. Madison, WI, U.S.A.
- Ashihara H., H. Sano, A. Crozier. 2008. Caffeine and related purine alkaloids: Biosynthesis, catabolism, function and genetic engineering. Phytochemistry 69: 841-856
- Atiyeh, RM, S. Lee, C. A. Edwards, N. Q. Arancon, J. D. Metzger. 2002. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. Bioresource Technol. 84: 7–14.
- AWWA APHA 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters. 18th Edition, Washington D. C.
- Baigorri, R., M. Fuentes, G. González–Gaitano, J. M. García-Mina, G. Almendros, F. J. González–Vila. 2009. Complementary multianalytical approach to study the distinctive structural features of the main humic fractions in solution: gray humic acid, brown humic acid, and fulvic acid. J. Agric. Food Chem. 57: 3266–3272
- Baker, R. T. 1976. Changes in the chemical nature of soil organic phosphate during pedogenesis. J. Soil Sci. 27: 504–512.
- Bansal, S., K. Kapoor. 2000. Vermicomposting of crop residues and cattle dung with *Eisenia foetida*. Biores. Technol. 73: 95–98.
- Barazarte H., Sangronis E., Unai E. 2008 La cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.): una posible fuente comercial de pectinas. Arch. Latinoam. Nutr. 2008. 58: 64-70. Soc. Latinoam. de Nutrición, Venezuela.
- Barois, I. 1999. Las lombrices de tierra como recurso en los agroecosistemas tropicales pp 21–22 *En* Martínez C., C., R. Romero, L. Corlay, A. Trinidad, L. F. Santoyo, Eds. I Simposium Internacional y Reunión Nacional Lombricultura y Abonos Orgánicos. SAGAR–UIPM, C. P. Montecillos y U. A. Chapingo, México.
- Baudoin, L, C. Baril, A. C. Penarg, T. Leory, D. Paulin. 1991. Recurrent selection of tropical tree crops. Euphytica 96: 101–114.
- Benckiser, G., ed. 1997. Fauna in Soil Ecosystems. Dekker, N.Y.
- Black, C. A., ed. 1965. Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy. Madison, Wis. U.S.A.
- Blaine M., F., ed. 1993. Soil Microbial Ecology. Dekker. N. Y.
- Blair, J. M., R.W. Parmelee, P. Lavelle. 1995. Influences of earthworms on biogeochemistry. pp.127–158 *in* Earthworm Ecology and Biogeography in North America (ed. P. F. Hendrix), Lewis Publishers, Boca Raton, FL,
- Blanco, M. J., G. Almendros. 1994. Maturity assessment of wheat straw composts by thermogravimetric analysis. J. Agric. Food Chem. 42: 2454–2459.
- Blanchart, E. 1999. Earthworms and soil structure and physical properties in kaolinitic and smectitic tropical soils. Symp. 32, Sci. Reg. 205 I Simposium Internacional y 1ª Reunión Nacional Lombricultura y abonos orgánicos. SAGAR–UIPM, CPMontecillos y UACHapingo, México.
- Bonheví, J. S., R. E. Jordá. 1998. Constituents of Cocoa Husks. V. Z. Naturforsch. 53: 785–792. Tubingen.

- Borchardt, G.A. 1977. Montmorillonite and other smectite minerals. Pp 293-324, Chapter 9 in Dinauer, R. C., J. B. Dixon, S. B. Weed, J. A. Kittrick, M. H. Milford, J. L. White (Eds) Minerals in Soil Environments. Soil Science Society of America. Madison, Wi. USA.
- Boyd, S. A., M. M. Mortland, M.M. 1990 Enzyme interactions with clays and clay-organic matter complexes. Chap. 1 in J. M. Bollag, G.Stotzky (Eds). Soil Biochem. 6: 1–27. Dekker. New York.
- Broca B., S. 1998. Gerente de Industrializadora de Cacao de Tabasco, S. A. Comunicación verbal.
- Brownlee, H. E., J. Hedger, I. M. Scott. 1990. Host extracts cause morphological variation in germ-tubes of the cocoa pathogen, *Crinipellis pernicioso*. Mycol. Res. 94: 543–547.
- Brownlee, H.E., A. R. Mc Euen, J. Hedger, J., M. Scott. 1990. Anti-fungal effect of cocoa tannin on the witches' broom pathogen *Crinipellis pernicioso*. Physiol. Mol. Plant Pathol. 36: 39–48.
- Bruun T. B., B. Eberling, B. T. Christensen. 2010. Lability of soil organic carbon in tropical soils with different clay minerals. Soil Biol. Biochem. 42: 888–895
- Burdon, J. 2001. Are the traditional concepts of the structures of humic substances realistic? Soil Sci. 166:752-769.
- Burns, R. G. 1978. Enzymes in soils: some theoretical and practical considerations in R. G. Burns, ed. Soil Enzymes. Academic Press, New York. Pp. 295–339
- Burns, R. G. 1986. Interactions of enzymes with soil mineral and organic colloids in P. M. Huang and M. Schnitzer (eds), Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. Spec. Publ. no. 17. SSSA, Madison, Wis. pp. 429–451
- Burt, R., ed. 2004. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soi Survey Investigations Report No. 42. USDA-NRCS. Lincoln, NE USA. Métodos 1B1b2 7.24 a 7.27, y 1B1b2b 7.40.
- Canellas, L. P., F. L. Olivares, A. L. Okorokova-Façanha, A. R. Façanha. 2002.Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺ -ATPase activity in maize roots. Plant Physiol. 130: 1951–1957.
- Carballo, T., M. V. Gil, X. Gómez, F. González A., A. Morán. 2008. Characterization of different compost extracts using Fourier.transform infrared spectroscopy (FTIR) and thermal analysis. Biodeg. 19: 815–830. Springer.
- Clapp C. E., M. H. B. Hayes. 1999. Sizes and shapes of humic substances. Soil Sci. 164: 777-789.
- Clesceri, L. S., A. E. Greenberg, R. R. Trussell (Eds). 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. AWWA APHA. Eds. Diaz de Santos, S. A. Madrid.
- Coleman, D. C., J. M. Oades, G. Uehara (Eds) 1989. Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. NiftAL Project, Univ. of HawaiiPress.
- Compagnoni, L., G. Putzolu. 1995: Cría moderna de las lombrices y utilización rentable del humus. De Vecchi, S.A. Barcelona.
- Conte, P., A. Piccolo. 1999. Conformational arrangement of dissolved humic substances, influence of solution composition on association of humic molecules. Env. Sci. Technol. 33: 1682-1690.
- Coq, S., B. G. Barthès, R. Oliver, B. Rabary, E. Blanchart. 2007. Earthworm activity affects soil aggregation and organic matter dynamics according to the quality and localization of crop residues—An experimental study (Madagascar). Soil Biol. Biochem. 39: 2119–2128.

- Cromack, K., P. Sollins, R. L. Todd, R. Fogel, A. W. Todd, W. M. Fender, M. E. Crossley, D. A. Crossley. 1977. The role of oxalic acid and bicarbonate in calcium cycling by fungi and bacteria: Some possible implications for soil animals *in* Soil Organisms as components of ecosystems. *Ecol. Bull.* 25: 246–252.
- Cronquist, A. 1969: Introducción a la Botánica. Cía. Ed. Continental, S. A. México.
- Cros, E. 2000. Factores condicionantes de la calidad del cacao. Memorias del Primer Congreso Venezolano del Cacao y su Industria. P 16-32. CONICIT. ISBN 980–620–56–1, © 2000.
www.redcacao.info.ve/memorias/index.html
- CRTP Centro Regional Tropical Puyacatengo. 1994. Publicaciones del CRTP 1: fisiografía y geología. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Cuatrecasas, J. 1964. Cacao and its allies: a taxonomic revision of the genus *Theobroma*. Smithsonian Institute, Washington, D.C.
- Cuenca, G., E. Meneses. 1996. Diversity patterns of arbuscular mycorrhizal fungi associated with cacao in Venezuela. *Plant and Soil* 183: 315–322.
- Cunningham, R. K., P. W. Arnold. 1962. The shade and fertilizer requirements of cacao (*Theobroma cacao*) in Ghana. *J. Sci. Food Agr.* 13: 213–221.
- Cunningham, R. K., J. C. Burridge. 1960: The growth of cacao (*Theobroma cacao*) with and without shade. *Ann. Bot. (London)*. N. S. 24: 458–462.
- Chatt, E.M. 1953. Cocoa: cultivation, processing, analysis. Interscience Publishers Inc. N.Y.
- Chen, Y., N. Senesi, M. Schnitzer. 1977. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41 : 352–358.
- Dabin, B. 1971. Etude d'une methode d'extraction de la matière humique du sol. *Sci. du Sol* 1:47–63.
- Delbeke, F. T., M. Debackere. 1991. Urinary excretion of theobromine in horses given contaminated pelleted food. *Vet. Res. Comm.* 15: 107–116.
- Derenne, S., C. Lagueau. 2001. A review of some important families of refractory macromolecules: composition, origin and fate in soils and sediments. *Soil Sci.* 166: 833-847.
- Desjardins, T., F. Charpentier, B. Pashanasi, A. Pando-Bahuon, P. Lavelle, A. Mariotti. 2004. Effects of earthworm inoculation on soil organic matter dynamics of a cultivated ultisol. *Pedobiologia* 47: 835–841.
- Diaz, L. F., G.M. Savage, L. L. Eggerth, L. Rosenberg, 2005. UNEP International Environmental Technology Centre. Solid waste management. United Nations Environment Programme. Paris.
- Díaz del C., B. 1986. Historia verdadera de la conquista de la Nueva España. Porrúa, México.
- Dickerson, G. W. 2004. Vermicomposting. New Mexico State University. College of agriculture and home economics. New Mexico.
- Diden, W., J. Marinissen. 1994. Effects of *Oligochaete* worms on soil aggregates, and implications for organic matter dynamics. T. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México. Vol. 2b a 8b: 92-98.
- Dietz, M. J. (ed) 1974. 10,000 garden questions answered by 20 experts. Vol. I. Doubleday and Co. Inc., Garden City, N. Y. –Section 1: Soils and Fertilizers. R. Milton Carleton, pp. 1–88.
- Dixon, J. B., R. C. Dinauer (Eds). 1977. Minerals in Soil Environments. Soil Science Society of America. Madison, Wis. USA.
- Domínguez, V. I., N. Aguilera. 1982. Metodología de Análisis Físicoquímicos de Suelos. Fac. de Ciencias UNAM. México.

- Dorado, J., G. Almendros, J.A. Field, R. Sierra A. 2001. Infrared spectroscopy analysis of hemp (*Cannabis sativa*) after selective delignification by *Bjerkandera* sp. at different nitrogen levels. *Enz. Mic. Tech.* 28: 550-559.
- Dorado, J., M. Zancada, G. Almendros, C. López-Fando. 2003. Changes in soil properties and humic substances after long-term amendments with manure and crop residues in dryland farming systems. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166: 31–38.
- Driessen, P., J. Deckers, O. Spargaaren, F. Nachtergaele, eds. 2001. *Lecture notes on the major soils of the world.* FAO. Rome.
- Duxbury, J. M., M. S. Smith, J. W. Doran, C. Jordan, L. Szott, E. Vance. 1989. Soil Organic Matter as a Source and a Sink of Plant Nutrients *in* D. C. Coleman, J. M Oades, G. Uehara. *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems.* University of Hawaii Press.
- Edwards, A. P., J. M. Bremner. 1967. Microaggregates in soils. *J. Soil Sci.* 18: 64–73.
- Edwards C. A., R. Lofty. 1977. *The biology of earthworms.* 2nd ed. Chapman Hall, London.
- Edwards, C. A., P. J. Bohlen, D. R. Linden, S. Subler. 1995. Earthworms in agroecosystems. 185–213 *in* P. F. Hendrix, ed. *Earthworm ecology and biogeography in North America.* Lewis Publishers. Boca Raton, Fla.
- Edwards, C. A., P. J. Bohlen. 1996. *Biology and ecology of earthworms.* Chapman and Hall, London. 430 pp.
- Etienne, B. G., L. Elías M. 1982. Efecto de las cenizas arrojadas por el volcán Chichonal en los suelos agrícolas de la región. *Rev. Inst. Mex. Pet.* XIV (4): 14–19.
- Falaye, A. E., K. Jauncey. 1999. Acceptability and digestibility by tilapia *Oreochromis niloticus* of feeds containing cocoa husk. *Aquacult. Nutr.* 5: 157–161. FAO, 1995.
- Falaye, A. E., K. Jauncey, O. O. Tewe. 1999. The growth performance of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings fed varying levels of cocoa husk diets. *J. Aquacult. Trop.* 14: 1–10.
- Fan, L., A. T. Soccol, A. Pandey, L. Porto de S. V., C. R. Soccol. 2006. Effect of caffeine and tannins on cultivation of *Pleurotus* on coffee husks. *Brazilian J. Microbiol.* 37: 420–424.
- FAO. Driessen, P., J. Deckers, O. Spargaaren, F. Nachtergaele, eds. 2001. *Lecture notes on the major soils of the world.* FAO. Roma.
- Fassbender, H. W., E. Bornemisza. 1994. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina.* Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica.
- Fernández, F., ed. 2003. *Introducción a las hormigas de la región neotropical.* Instituto de investigaciones de recursos biológicos Alexander Von Humboldt, Bogotá, Colombia. XXVI. 399 pp.
- Fernández-Getino, A. P., Z. Hernández, A. Piedra Buena, G. Almendros. 2010. Assessment of the effect of environmental factors on humification processes by derivative infrared spectroscopy and discriminant analysis. *Geoderma* 158: 225-232.
- Ferruzzi, C. 1994. *Manual de Lombricultura.* Mundi-Prensa, Madrid.
- Field, J. *Degradación anaeróbica de compuestos orgánicos.* Universidad Agrícola de Wageningen, Holanda. www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/000866/000866f.pdf (Consultado en junio de 2009)
- Flaig, W. 1966. The chemistry of humic substances, pp. 103–127 *in*: International Atomic Energy Agency (Vienna). *The use of isotopes in soil organic matter studies.* Oxford. Pergamon Press.
- Flaig, W., H. Beutelspacher, E. Rietz. 1975. Chemical composition and physical properties of humic substances *in* J. E. Gieseking, ed. *Soil Components Vol. 1: Organic Components.* Springer, Berlin.

- FOMSA. 1960. Fertilizantes Orgánicos de México S.A. Transformación de basuras y desperdicios agrícolas en humus. Proceso Earp–Thomas. México, D. F.
- Fragoso, C., P. Rojas. 1994. Soil biodiversity and land management in the tropics. The case of ants and earthworms *in* T. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México. Vols. 2b a 8b 232–237.
- Fragoso, C., S. W. James, S. Borges. 1995. Native earthworms of the north neotropical region: current status and controversies. pp 67–116. *In* Hendrix, P.F., ed. Earthworm Ecology and Biogeography in North America. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Fragoso, C. 2001 Las lombrices de tierra de México (*Annelida, Oligochaeta*): diversidad, ecología y manejo. Acta Zool. Mex. (n.s.) Núm. especial 1: 131–171.
- Fragoso, C., P. Lavelle. 1992. Earthworm communities of tropical rain forests. Soil Biol. Biochem. 24: 1397–1408.
- Fraire S., I. 1998. Comunicación personal.
- Fraser P.M., Beare M. H., Butler R. C., Harrison-Kirk T., Piercy J. E. 2004 Interactions between earthworms (*Aporrectodea caliginosa*), plants and crop residues for restoring properties of a degraded arable soil. Pedobiologia 47: 870–876.
- Fründ, R., H. D. Lüdemann, F.J. Gonzalez-Vila, G. Almendros, J.C. Del Rio, F. Martin. 1989. Structural differences between humic fractions from different soil types as determined by FT-IR and 13 C-NMR studies. STENDL 81-82: 187-194.
- Gajalakshmi, S., S. A. Abbasi. 2004. Neem leaves as a source of fertilizer-cum-pesticide vermicompost. Biores. Technol. 92: 291–296.
- García, C., T. Hernández, F. Costa. 1992. Characterization of humic acids from uncomposted and composted sewage sludge by degradative and non degradative techniques. Biores. Technol. 41: 53–57.
- García C., N. E. 1999. Cambios en las características de las sustancias húmicas por la actividad de las lombrices de tierra, pp 67-74 en: C. Martínez C., R. Romero, L. Corlay, A. Trinidad, L. F. Santoyo, eds. 1999. I Simposium Internacional y Reunión Nacional Lombricultura y Abonos Orgánicos.
- García C., N. 2001. Métodos para la determinación de materia orgánica en suelos. Fac. Ciencias, UNAM (en prensa).
- García F. S., R. 1976. Diferentes procesos de industrialización del cacao. Tesis, Químico, UNAM. Fac. Química, 171 pp.
- García Silva, R., D. Espinosa-Victoria, B. Figueroa-Sandoval, N. E. García-Calderón, J. F. Gallardo-Lancho. 2006. Reservas de carbono orgánico y de fracciones húmicas en un Vertisol sometido a siembra directa. Terra Latinoam. 24: 241–251. UACH.
- Golchin, A., J. A., Baldock, J. M. Oades. 1997. A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics. *In*: R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follett, B. A. Stewart. Soil processes and the carbon cycle. CRC. Boca Raton, Fla. USA.
- Guagnini, O. A., E. E. Vonesch, M. H. C. de Riverós. 1961. Estudios sobre ácidos hidroxámicos XI. Microvaloración de grupos metoxilos en pectinas. Microchim. Acta 1961/3. 408-414.
- Gutierrez, A., M. J. Martínez, G. Almendros, F. J. Gon. 1995. Hyphal-sheath polysaccharides in fungal deterioration. STENDL 167: 315–328.
- Haider, K., J. P. Martin, Z. Filip. 1975. Humus Biochemistry *in* E. A. Paul and A. D. Mc Laren, eds. Soil Biochem. V. 4: 195–244. Marcel Dekker Inc. New York..

- Haider, K. 1992. Problems related to the humification processes in soils of temperate climates *in* Stotsky J.M. and J.M. Bollag, eds. *Soil Biochem.* 7: 55-94. Dekker. New York. 418 pp.
- Hara, M.; H. Kazuhisa, I. Hirokazu, 1999. Detection of free aminoacids using paper chromatography for evaluating degree of compost maturity. *J. J. Sci. Plant Nutr.* 70:306–314. (abstract in English).
- Harris D. C. 2001. *Análisis químico cuantitativo.* Ed. Reverté, Barcelona.
- Hatcher, P. G., E. C. Spiker, N. M. Szeverenyi, G. E. Maciel. 1983. Selective preservation and origin of petroleum-forming aquatic kerogen. *Nature* 305: 498–501.
- Hatcher, P. G., I. A. Breger, G. E. Maciel, N. M. Szeverenyi. 1985. Geochemistry of humin. Pp 275–302 *in* Aiken, G. R., D. M. McKnight, R.L. Wershaw, P. MacCarthy, eds. *Humic substances in soil, sediment, and water.* Wiley, New York.
- Hatcher, P. G., E. C. Spiker. 1988. Selective degradation of plant biomolecules. 59–74. *In* F. H. Frimmel, R. F. Christman, Eds. *Humic Substances and their Role in the Environment.* Wiley, New York.
- Haug, R. T. 1980. *Compost engineering: principles and practice.* Ann Arbor Sci. Michigan.
- Hauser, S., B. Vanlawe, D. O. Asawalan. 1994. Role of earthworms in low input agricultural systems *in* T. 15th World Congress of Soil Science. V. 2b a 8b: 55–56. Acapulco, México.
- Hayes, M. H. B., C. E. Clapp. 2001. Humic substances: considerations of compositions, aspects of structure, and environmental influences. *Soil Sci.* 2001, 166: 723–737.
- Hayes, M. H. B. 2006. Solvent systems for the isolation of organic components from soils. *Soil Sci Soc Am J* 70: 986–994.
- Hedges, J. Y. 1988. Polymerization of Humic Substances in Natural Environments pp. 45–58 *in* Frimmel, F. H, R. F. Christman, eds. *Humic substances and their role in the environment.* Wiley. N. Y.
- Hernández, C. J. 1981. *Fitotecnia del Cacao.* Edit. Pueblo y Educación. La Habana.
- Herrera T., M. Ulloa. 1990. *El reino de los hongos, micología básica y aplicada.* UNAM - Fondo de Cultura Económica. México. 551 pp
- <http://academic.evergreen.edu/projects/ants/genera/camponotus/species/Jtl-056.html>
- Horowitz, W., ed. 1990. *AOAC Official Methods of Analysis.* 15th Ed. Washington, D. C. pp 199-203.
- Huang, P. M., M. Schnitzer, eds. 1986. Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. SSSA Special publication 17. Madison, Wis.
- Huang P. M. 1990. Role of soil minerals in transformations of natural organics and xenobiotics in soil *in* J M Bollag G Stotzky eds. *Soil Biochemistry* Vol. 6 Dekker. New York-Basel.
- Huerta, E., J. Rodriguez-Olan, I. Evia-Castillo, E. Montejó-Meneses, M. De la Cruz-Mondragon, R. Garcia-Hernandez. 2005. La diversidad de lombrices de tierra (Annelida, Oligochaeta) en el Estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia* 21 (42): 73-83.
- Huerta, E.; J. Rodriguez-Olan, I. Evia-Castillo, E. Montejó-Meneses, M. De la Cruz-Mondragon, R. Garcia-Hernandez, S. Uribe. 2007. Earthworms and soil properties in Tabasco, Mexico. *Eur. J. Soil Biol.* 43:s190-s195.
- Huerta L. E., O. Valier, B. Mendoza. 2009 ¿Cuál es el mejor tiempo de cosecha de lombrices endógenas? Estudio en microcosmos de *Lavello-drilus bonampakensis*, *Balanteodrilus pearsei* y *Pontoscolex corethrurus*. www.uamac.uat.edu.mx/Espananza%20Huerta%20Lwanga.pdf

- IHSS 2007. <http://www.ihss.gatech.edu/> IHSS Homepage. Introduction to the International Humic Substances Society.
- Indore.htm 2010. <http://www.daenvis.org/technology/indore.htm>
- INEGI. 1986. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Síntesis geográfica, nomenclator y anexo cartográfico del Estado de Tabasco. México.
- Janda, K. 2004 Ability of the strains of the thermophilic fungus *Thermomyces lanuginosus* to hydrolyze cocoa fat and lard. *Roczniki Państwowego Zakład Higieny* 55: 83–87.
- Jennings, H., J. Lysek. 1996. *Fungal Biology*. Bios Sci. Pub.
- Jeyabal, A., G. Kuppaswami. 2001. Recycling of organic wastes for the production of vermicompost and its response in rice-legume cropping system and soil fertility. *Eur. J. Agron.* 15: 153–170.
- Jiménez J., J. 2006. Identificación de hongos micromicetos asociados al composteo de la cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo condiciones de laboratorio. Tesis, Licenciatura en Ecología, DACB–UJAT.
- JMP Statistics Made Visual, 1989–97 SAS Institute, Inc. Cary, N.C. USA
- Jones, J. B., B. Wolf, H. A. Mills. 1991. *Plant Analysis Handbook*. Micro-Macro Publishing Inc. Athens, Georgia, USA.
- Joschko M., O. Wendroth, H. Rogasik, K. Kotzke. 1994. Earthworm activity and functional and morphological characteristics of soil structure. Vol ID 13: 144–163. T. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México.
- Jtajbakhsh, J.; E. M. Gotayeh, A. Varma. 2011. Vermicompost as a biological soil amendment in Karaca, A., ed. *Biology of Earthworms*. 1st. Edition. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. Soil Biology Series v. 24.
- Kadari M. 1999. Changes in intracellular and extracellular activities of *Certinus subcinalis* during sporophore development. *BioSoil Res. Commun.* 11: 127-130.
- Kalembasa, S.; D Kalembasa, K. Makowiecki, A. Godlewska. 1994. Elemental composition and spectrophotometric characteristics of humic acids extracted from vermicomposts. *Polish J. Soil Sci.* 27: 93-101.
- Karaca, A., ed. 2011. *Biology of Earthworms*. Soil Biology Series vol. 24. Springer. Berlin.
- Karrer, P. 1965. *Tratado de Química Orgánica*. Editora Nacional, México.
- Kearney, P. C., D. D. Kaufman. 1972. Microbial degradation of some chlorinated pesticides in *Degradation of Synthetic Organic Molecules in the Biosphere*. Natl. Acad. of Science. Washington, D. C. Pp. 166–189
- Kögel-Knabner, I. 1993. Biodegradation and humification processes in forest soils, chap. 3 in Bollag, J.M., G. Stotzky, eds.. *Soil Biochemistry*, Vol. 6. Dekker. New York. pp. 101–135.
- Kononova M, M. 1961. *Soil organic matter*. Pergamon, London.
- Kononova M. M. 1982. *Materia orgánica del suelo: su naturaleza, propiedades y métodos de investigación*. Oikos-tau S. A. Barcelona, España.
- Kotcon, J. B. 2011. Population dynamics of the earthworms in organic farming systems. Pp 299-310 in Karaca, A., *Biology of Earthworms*. Springer. Berlin.
- Kowalenko C. G. 1978. Organic nitrogen, phosphorus and sulfur in soils, chap. 3 in M. Schnitzer, S U Khan eds. *Soil organic matter*. Elsevier, Amsterdam.

- Laird, D. A., D. A. Martens, W. L. Kingery. 2001. Nature of clay-humic complexes in an agricultural soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1413–1418
- Laird, D. 2001. Nature of clay-humic complexes in an agricultural soil, II. Scanning electron microscopy analysis. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 65: 1419–1425.
- Lal, R. 1987 *Tropical ecology and physical edaphology*. Wiley. Chichester.
- Lavelle, P. M. Dangerfield, C. Fragoso, V. Eschenbrenner, D. Lopez-H., B. Pashanasi, L. Brussaard 1994. The relationship between soil macrofauna and tropical soil fertility. Chap. 6 *in* P. L. Woomer and M. I. Swift. *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. TSBF. Wiley-Sayce. London.
- Lee, K. E. 1985. *Earthworms: their ecology and relationships with soil and land use*. Academic Press. Adelaide, Australia.
- Lee, K. E. 1995. Earthworms and sustainable land use, pp. 215–234 *in* Hendrix, P. F., ed. *Earthworm ecology and biogeography in North America*. Lewis Publishers, Boca Raton, USA.
- Leroy, B. L.M., O. Schmidt, A. V. d. Bossche, D. Reheul. M. Moens. 2008. Earthworm population dynamics as influenced by the quality of exogenous organic matter. *Pedobiologia* 52:139-150.
- Little, T. M.; F. Jackson H. 1979. *Métodos estadísticos para la investigación en agricultura*. Editorial Trillas, México. 270 pp.
- Lomnitz, C. 1982. Erupción del Chichonal. *IC yT* 4(70): 9-11.
- López Mendoza, R. 1987 *El Cacao en Tabasco*. Universidad Autónoma Chapingo, México. 287 pp.
- López-Ulloa, M., E. Veldkamp, G. H. J. de Koning. 2005. Soil Carbon Stabilization in Converted Tropical Pastures and Forests Depends on Soil Type. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1110–1117.
- Lossin, R. D. 1970. Compost studies. *Compost Science* 11: 16. Cito *in* Diaz, L. F., G.M. Savage, L. L. Eggerth, L. Rosenberg. *Solid Waste Management*. UNEP International Environmental Technology Centre. CalRecovery, Inc. California USA.
- Lowe, L. E. 1975. Fractionation of acid-soluble components of soil organic matter using polyvinyl pyrrolidone. *Can. J. Soil Sci.* 55: 119–126.
- MacCarthy, P., H. B. Mark Jr., P. R. Griffiths. 1975. Direct measurement of the infrared spectra of humic substances in water by fourier transform infrared spectroscopy. *J. Agr. Food Chem.* 23: 600–602.
- MacCarthy, P., J. A. Rice. 1985. *Spectroscopic methods (other than NMR) for determining functionality in humic substances*. Wiley. New York.
- MacCarthy, P. 2001. The principles of humic substances. *Soil Sci.* 166:738–751
- Machado S., M. B., K. Igue. 1979. Composicao química das folhas do cacueiro em funcao da idade e da época do ano. *Rev. Theobroma (Brasil)* 9: 63–76.
- Magaña A., M. A. 1995. *Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas de Tabasco*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. 205 pp.
- Maillard, M.L. 1916. Synthèse des matières humiques par action des acides aminés sur les sucres réducteurs. *Ann. Chim.* 5: 258-317.
- Makeschin, F. 1997. Earthworms (Lumbricidae, Oligochaeta): Important promoters of soil development and soil fertility *in* Benckiser, G., ed. 1997: *Fauna in soil ecosystems. Recycling processes, nutrient fluxes, and agricultural production*. Dekker. N. Y. 414 pp.

- Maldonado M., F., G. Vargas S., R. F. Molina M. 1997. Los Cercos Vivos del Estado de Tabasco, México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Div. Acad. Ciencias Biológicas. Villahermosa, Tab. México. 72 pp.
- marcas01@prodigy.net.mx Mario Carrera Silva, enero de 2005
- Mangum, C. P. 1978. Temperature adaptation. Chapter 11 in Mill, P. J., ed. 1978. Physiology of annelids. Academic Press. N. Y. 683 pp.
- Margaleff, R. 2005. Ecología. Omega, Barcelona.
- Martin, J. P., J.O. Ervin, R. A. Shephard. 1966. Decomposition of the iron, aluminum, zinc, and copper salts or complexes of some microbial and plant polysaccharides in soil. SSSA Proc. 30: 196–200.
- Martin, J. P., K. Haider. 1971. Microbial activity in relation to soil humus formation. Soil Sci. 111: 54–63.
- Martin, J. P., Haider, K. 1986. Influence of mineral colloids, and turnover rates of soil organic carbon. Chap. 9 (pp 283-304) in Huang, P. M., M. Schnitzer eds. 1986. Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. SSSA Special publication 17. Madison, Wis.
- Martin, N.; L. R. Rosell, G. Sposito 1998. Correlation of spectroscopic indicators of humification with mean annual rainfall along a temperate grassland climosequence. Geoderma 81: 305-311.
- Martinez C., C 1999. Situación actual de la lombricultura en México. pp 29–37 en Martínez C., C; M.R. Romero L, L. Corlay C., A. Trinidad S., L.F. Ramírez S., eds. I Simposium Internacional y 1a Reunión Nacional Lombricultura y abonos orgánicos. SAGAR-UIPM, CP Montecillo, UA Chapingo. México.
- Matissek, R. 1997. Evaluation of xanthine derivatives in chocolate: nutritional and chemical aspects. Z. Lebensmittel-Untersuch. –Forsch. A 205(3): 175–184.
- McCarthy, P., J. Are. 1985. Spectroscopic Methods (other than NMR) for determining functionality in humic substances. Chapter 21 in Aiken, G. R., D. M. Mc Knight, R. L. Wershaw, P. McCarthy, eds. 1985. Humic substances in soil, sediment, and water. Wiley. N. Y.
- McGill, W. B., E. A. Paul. 1976. Fractionation of soil and ¹⁵N nitrogen to separate the organic and clay interactions of immobilized N. Can. J. Soil Sci. 56: 203–212
- Meyer, B. S., D. B. Anderson, R. H. Böhnig. 1966. Introducción a la fisiología vegetal. Edit. Universitaria de Buenos Aires, Argentina.
- Michel, C.; E. J. Devillez. 1978. Oligochaetes. Chap. IV. pp 524-525 in Mill, P. J. 1978. Physiology of Annelids. Academic Press, N. Y. San Francisco.
- Microsoft © 2004. programa Excel .
- Microsoft Office XP © 2000.
- Mill, P. J. 1978. Physiology of Annelids. Academic Press, N. Y. San Francisco. 683 pp
- Miller, F.C. 1993. Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. Pp 515-543 in B. Metting Jr. (Editor): Soil Microbial Ecology. Marcel Dekker Inc. New York.
- Minifie, B. W. 1989. Chocolate, cocoa, and confectionery: science and technology. 3th. edition. Van Nostrand Reinhold. N. Y.
- Miyaji, K., W. Da Silva, P. de T. Alvim. 1997. Longevity of leaves of a tropical tree, *Theobroma cacao*, grown under shading, in relation to position within the canopy and time of emergence. New Phytol. 135: 445–454.

- Molina E. M., J. F. F., N. E. García C. 2000 Aprovechamiento de los desechos de cacao mediante composteo y su efecto en el suelo. En: R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez-Huerta y N. E. García-Calderón, eds. 2000. La Edafología y sus perspectivas al Siglo XXI. Tomo I. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Molina-Murguía, J. F. F., N. E. García-Calderón, G. Almendros-Martín. 2009. Cocoa industrial debris composting in soil and earthworm breeding. *Compost Sci. Util.* 17:197-204.
- Montgomery, D. C. 1991. *Diseño y Análisis de Experimentos*. Gpo. Ed. Iberoamérica, S. A. de C. V. México.
- Mora, P., C. Seugé, J. L. Chotte, C. Rouland. 2003. Physico-chemical typology of the biogenic structures of termites and earthworms: a comparative analysis. *Biol. Fertil. Soils* 37: 245–249.
- Mubyana-John, T., V. C. Wutor, S. O. Yeboah, S. Ringrose. 2007. Fire and its influence on microbial community structure and soil biochemical properties in the Okavango Delta, Botswana. *Sci. Res. Essay* 2: 047–054. <http://www.academicjournals.org/SRE>
- Mustin, M. 1987. *Le Compost: gestion de la matière organique*. François Dubusc. Paris.
- Naeini, S. A. R. M., H. F. Cook. 2000. Influence of municipal waste compost amendment on soil water and evaporation. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal.* 31: 3147–3161.
- Nandasena, K. A. 2000. Nitrogen status and its supplying capacity of tropical soils. *Proceed. 6th ann. forestry and environ. symp., Dept. of Forestry and Env. Sci., University of Sri Jayawardenapura and Ministry of forestry and environment*. Kandy, Sri Lanka.
- Nascimento, V. M., G. Almendros, F. M. Fernández. 1993. Evolution patterns of the soil organic matter in some agricultural systems in the Brazilian "Cerrado" region. *Eur. J. Soil Biol.* 29: 177–182.
- Nelson, D. W., L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter *in* Page, A. L. (ed) 1982. *Methods of Soil Analysis, part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. Agronomy Monograph no. 9, 2nd ed. ASA–SSSA, Madison, Wis. USA
- North Central Regional NCR Publication No. 221, J. R. Brown (editor). 2011. *Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region. Bulletin 499 (Revised). Recommended Test Procedures for Greenhouse Growth Media*. USDA Missouri Agricultural Experiment station SB 1001, Missouri. USA.
- Ochmian, I., J. Grajkowski, K. Ostrowska. 2006. Growth and yield of American blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) of 'patriot' cultivar grown on three types of organic bed. *Electr J Polish Agr Univs, Horticulture*, 9: 3.
- Odedina, S. A., S. O. Ojeniyi, M. A. Awodun. 2007. Effect of agroindustrial wastes on nutrient status and performances of tomato. *Global J. Env. Res.* 1: 18–21.
- Oglesby, L.C. 1978. Salt and Water Balance, chapter 14 *in* Mill, P. J. 1978. *Physiology of Annelids*. Academic Press, N. Y. San Francisco
- Ojeniyi S. O., M.A. Awodun, S. A. Odedina. 2007. Effect of animal manure amended spent grain and cocoa husk on nutrient status, growth and yield of tomato. *Middle-East J. Sci. Res.* 2: 33–36.
- Olubamiwa, O., A. R. Otun, O. G. Longe. 2002. Dietary Inclusion Rate of Cocoa Husk for Starter Cockerels. *Int. J. Poultry Sci.* 1: 133–135.
- Osborn A. E., V. Lanzotti, eds. 2009. *Plant-derived Natural Products. Synthesis, Function, and Application*. Springer. N. Y.
- Page, A. L., ed. 1982. *Methods of Soil Analysis, part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. Agronomy Monograph no. 9, 2nd ed. ASA–SSSA, Madison, Wis. USA.

- Palma L., D. J., J. Cisneros D., A. Trujillo N., N. Granados A., J. E. Serrano B. 1985. Caracterización de los suelos de Tabasco. Uso actual, potencial y taxonomía. Gobierno del Estado de Tabasco SECUR-DESIC. Villahermosa, Tabasco. México.
- Palma L., D. J., J. Cisneros D. 1996. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Fundación Produce Tabasco, A.C. México.
- Pansu, M., J. Gautheyrou. 2006. Handbook of soil analysis. Mineralogical, organic and inorganic methods. Springer, N. Y. (Ch. 11 Quantification of humic compounds, pp 371-389).
- Pape Th. and D. Legger, eds. 1994. Manual for soil description and classification. Wageningen Agricultural University.
- Parmelee, R. W., D. A. Crossley. 1988. Earthworm production and role in the nitrogen cycle of a no-tillage agroecosystem on the Georgia piedmont. *Pedobiologia* 32: 351–361.
- Parr, J. F., S. B. Hornick. 1993. Utilization of municipal wastes, chap. 19 in B. Metting, Jr. Soil microbial ecology. Marcel Dekker Inc. New York.
- Pascual, J. A., T. Hernández, C. García, F. A. A. M. de Leij, J. M. Lynch. 2000. Long-term supression of *Pythium ultimum* in arid soil using fresh and composted municipal wastes. *Biol. Fertil. Soils* 30: 478–484.
- Pashanasi, B., P. Lavelle, J. Alegre, F. Charpentier. 1996. Effect of the endogeic earthworm *Pontoscolex corethrurus* on soil chemical characteristics and plant growth in a low-input tropical agroecosystem. *Soil Biol. and Biochem.* 28: 801–810.
- Patrick McCarthy, P., J. Are. 1985. Spectroscopic Methods (other than NMR) for determining functionality in Humic substances. Chapter 21 in Aiken, G. R., D. M. Mc Knight, R. L. Wershaw, P. MacCarthy (editors): *Humic Substances in Soil, Sediment, and Water*. Wiley. N. Y.
- Paul, E. A., F. E. Clark. 1996. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, San Diego. USA.
- Perdue, E. M. 1985. Acidic functional groups of humic substances in Humic substances in soil, sediment, and characterization. Wiley. N. Y.
- Pettipher, G. L. 1988. Cultivation of the oyster and shiitake mushrooms on lignocellulosic wastes. *Mushroom J.* 103: 491–493.
- Piccolo, A. 2001. The supramolecular structure of humic substances. *Soil Sci.* 166: 810–832.
- Pizl V., A. Nováková. 2004. Interactions between microfungi and *Eisenia andrei* (Oligochaeta) during cattle manure vermicomposting. *Pedobiologia* 47: 895–899.
- Plaza, C., N. Senesi, A. Polo, G. Brunetti. 2005. Acid-base properties of humic and fulvic acids formed during composting. *Env. Sci. Technol.* 39: 7141–7146.
- Porta-Casanellas, J., M. López-Acevedo, C. Roquero. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa, Madrid.
- Qualley, A. V., N. Dudareva. 2008. Aromatic volatiles and their involvement in plant defense. Pp 409–432 in Andreas Schaller, ed. *Induced Plant Resistance to Herbivory*. Springer. University of Hohenheim, Stuttgart.
- Ramalingam, R. M. Thilagar. 2000. Bio-conversion of agro-waste sugarcane trash using an Indian epigeic earthworm, *Perionyx excavatus* (Perrier). *Indian J. Env. & Ecoplanning.* 3: 447–452.
- Reddy, M. V., K. Ohkura. 2004. Vermicomposting of rice-straw and its effects on sorghum growth. *Trop. Ecol.* 45: 327–331.
- Rice, J. A. 2001. Humin. *Soil Sci.* 166: 848–857.

- Romera P., M. P. 2006. Agricultura Ecológica. www.infoagro.com/agricultura_ecologica/agricultura_ecologica14.asp cap. III, apdo. II: naturaleza de la materia orgánica del suelo.
- Rovira, P., V. Ramón-Vallejo. 2002. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. *Geoderma* 107: 109–141.
- Rubio A., H. O. 2003. Estadística experimental. INIFAP Chihuahua, México.
- Ruiz, M., G. Elizalde, J. Paolini. 1997. Caracterización de las sustancias húmicas presentes en microagregados de suelos de dos toposecuencias. *Agron. Trop.* 47: 381–395
- Russell, E. W. 1973. Russell's soil conditions and plant growth. Longman, U.K. 11th ed.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, México) 2000. Análisis de la situación comercial del cacao en Tabasco. SAGARPA Delegación Estatal de Tabasco. 16 pp.
- SAGARPA 2001. En <http://www.infoaserca.gob.mx/análisis/cacao.pdf>
- Sánchez H., R., V. M. Ordaz C., G. S. Benedicto V., D. J. Palma L., J. Sánchez B. 2007. Chemical characteristics of several vermicomposts in México. *Compost Sci. U.* 15: 47–52
- Sánchez M., A. 1999. Geografía agrícola de Tabasco. Características, tipos y regiones. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 249 pp.
- Sanchez S., O. 1978. La flora del Valle de México. Editorial Herrero S. A. México. 519 pp.
- Scheu, S. 1987. Microbial activity and nutrient dynamics in earthworm casts (Lumbricidae). *Biol. Fertil. Soils* 5: 230–234.
- Scheu, S. 2004. Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives. *Pedobiologia* 47: 846–856.
- Schnitzer M., S. U. Khan. 1972. Humic Substances in the Environment. Dekker, New York.
- Schnitzer, M. 1977. Recent findings on the characterization of humic substances extracted from soils from widely differing climatic zones. pp. 117–132 *in* Soil Organic Matter Studies. Vol. 2. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Schnitzer, M. 1978. Humic substances: chemistry and reactions. Chap. 1 *in* Schnitzer, M.; S. U. Khan, eds. Soil Organic Matter. Elsevier. Amsterdam.
- Schnitzer, M., S. U. Khan 1978. Soil Organic Matter. Elsevier. Amsterdam.
- Schnitzer, M. 1982. Organic matter characterization, chap. 30 pp 581–594 *in* ASA-SSSA Agronomy Monograph no. 9, 2nd ed. 1982. Methods of Soil Analysis, part 2. Chemical and microbiological properties. Madison, WI, USA..
- Senapati, B. K., P. K. Panigrahi, P. Lavelle. 1994. Macrofaunal status and restoration strategy in degraded soil under intensive tea cultivation in India. T. 15th World Congress of Soil Science. . Vol. 2b a 8b: 64-75 Acapulco, México.
- Senesi, N., T. M. Miano, M. R. Provenzano, G. Brunetti. 1989. Spectroscopic and compositional comparative characterization of IHSS reference and standard fulvic and humic acids of various origins. *Sci. Total Env.* D. L. 81/82: 143-156.
- Siller C., J. H. 1999. Situación Actual de la Industria Hortícola en México. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C. Unidad Culiacán. Carr. El Dorado km 5.7.Culiacán, Sin. 80129 México.
- Silva M., L., J. J. Cochemé. 1982. Estudio químico-petrográfico preliminar de la erupción del volcán Chichonal 1982. *Rev. Mex. Cien. Geol.* 4: 186–187.

- Silwar, R. 1988. Gaschromatographic-mass spectrometric investigation of cocoa aroma: quantitative determination of steam-volatile aroma constituents. *Café, cacao, the*. 32: 243–250.
- Skoog, D. A., D. M. West. 1992. *Análisis Instrumental*. Mac Graw-Hill. México.
- Smeaton, T.C., A. N. Daly, J. M. Cranwell. 2003. Earthworm population responses to cultivation and irrigation in a South Australian soil. *Pedobiologia* 47: 379–385.
- Šmejkalová, D., A. Piccolo. 2008. Aggregation and Disaggregation of Humic Supramolecular Assemblies by NMR Diffusion Ordered Spectroscopy (DOSY-NMR). *Environ. Sci. Technol.* 42: 699–706.
- Smith, H. H. 1913. *The fermentation of cacao*. Bale, Sons & Danielsson, London.
- Smith, J. L., R. I. Papendick, D. F. Bezdicsek, J. M. Lynch. 1992. Soil organic matter dynamics and crop residue management. Chap. 3 *in* F. Blaine Metting Jr., ed. *Soil Microbial Ecology. Applications in agricultural and environmental management*. Dekker, N. Y.
- Smith, J.L., E. A. Paul. 1993. The significance of soil microbial biomass estimations. chap. 7 (357-396) *in* Bollag, J.M., G. Stotzky, eds. 1993. *Soil biochemistry* Vol. 6. Dekker, N. Y.
- Smith, J., S. Potts, P. Eggleton. 2008. Evaluating the efficiency of sampling methods in assessing soil macrofauna communities in arable systems. *Eur. J. Soil Biol.* 44: 271–276
- Smyth A., J. 1966. The selection of soils for cocoa. *FAO Soils Bulletin* no. 5 FAO, Roma.
- Soil Survey Staff (USDA). 1995. *Claves para la Taxonomía de Suelos*. Traducción de C. A. Ortiz S., M. C. Gutiérrez C., J. L. García R. Publicación especial 3, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México. 306 pp.
- Solomon, S. 1992. Organic gardener's composting. Chap. 9 Making superior compost *in* <http://www.soilandhealth.org/03sov/0302hsted/030209.html>
- Spaccini R., A. Piccolo. 2009. Molecular characteristics of humic acids extracted from compost, at increasing maturity stages. *Soil Biol. Biochem.* 41:1164-1172.
- Spargaaren, O. C., ed. 1994: *World Reference Base for Soil Resources*. ISSS, ISRIC, FAO. Wageningen/Rome 161 pp.
- Springob, K.; T. M. Kutchan. 2009. Introduction to the Different Classes of Natural Products, chap. 1 *in* A. E. Osbourn, V. Lanzotti, eds. *Plant-derived Natural Products. Synthesis, Function, and Application*. Springer.
- Stevenson, F. J. 1965. Gross chemical fractionation of organic matter *in* Black, C. A., ed. *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy. Madison, Wis. USA.
- Stevenson, F. J., K. M. Goh. 1971. Infrared spectra of humic acids and related substances. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 35: 471–483.
- Stevenson, F. J., E. T. Elliot. 1989. Methodologies for assessing the quantity and quality of soil organic matter. Chapter 7, pp. 173-242 *in* Coleman, D. C., J. M. Oades, G. Uehara eds. *Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems*. NifTAL Project, University of Hawaii.
- Stevenson, F. J., ed. 1994. *Humus chemistry. Genesis, composition, reactions*. Wiley. N. Y.
- Stevenson, F. J. 1994. Extraction, fractionation, and general chemical composition of soil organic matter. Pp 24–58 *in* *Humus chemistry, genesis, composition, reactions*. Wiley. N. Y.
- Stotzky, G. 1986. Influence of soil mineral colloids on metabolic processes, growth, adhesion, and ecology of microbes and viruses *in* P.M. Huang and M. Schnitzer, ed. *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. Spec. Publ. No. 17, pp 305-428. S. S. S. A. Madison, Wis.

- Stout, J. D., K. M. Goh, T. A. Rafter. 1981. Chemistry and turnover of naturally occurring resistant organic compounds in soil. Chapter 1 in E. Paul y J. N. Ladd Eds. Soil Biochemistry, v. 5. Dekker. N. Y.
- Subba Rao, N. S., H. K. Wang, F. Blaine Metting Jr. 1993. Composting and organic waste management in China and India. Chap. 20 in F. Blaine Metting Jr., ed. 1993. Soil Microbial Ecology. Dekker. N. Y.
- Sutton, R., G. Sposito. 2005. Molecular structure in soil humic substances: the new view. *Env. Sci. Tech.* 39: 9009–9015.
- Swaby, R. J. 1968. Stability of soil organic matter and its significance in practical agriculture. Pp. 583–604 in Study week on organic matter and soil fertility. Wiley. N. Y.
- Swift, M. J., O. W. Heal, J. M. Anderson 1979. Decomposition in terrestrial ecosystems. Blackwell. University of California Press.
- Swift R. S. 1999. Macromolecular properties of soil humic substances: Fact, fiction, and opinion. *Soil Sci.* 164:790-802.
- Tajbakhsh, J., E. M. Gotayeh, A. Varma. 2011. Vermicompost as a biological soil amend-ment. Chap. 13 in Karaca, A., ed. Biology of Earthworms. Springer, N. Y.
- Tan, H. K. 2003. Humic Matter in Soil and the Environment. Principles and Controversies. Dekker. N. Y.
- Tanaka, A., J. Yamaguchi. 1984. Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano en maíz. Colegio de Posgraduados, México. Centro de Botánica. Trad. de J. Agr. 57, Hokkaido Univ. Sapporo, Japón. 120 pp.
- Tapia-Coral, S. C.; F. J. Luizão, E. Barros, B. Pashanasi, D. Del Castillo. 2006. Effect of *Pontoscolex corethrurus* Muller 1857 (Oligochaeta: Glossoscolecidae) inoculation on litter weight loss and soil nitrogen in mesocosm in the Peruvian Amazon. *Caribbean J. Sci.* 42: 410–418. University of Puerto Rico, Mayagüez.
- Tarka, S.M., Jr, R. B. Morrissey, J. L. Apgar, K. A. Hostetler, C. A. Shively. 1991. Chronic toxicity/carcinogenicity studies of cocoa powder in rats. *Food Chem. Toxicol.* 29: 7–19.
- Tate, K. R. 1972. Radiocarbon dating in studies of soil organic matter-vegetation relationships in Proceedings of the 8th International Radiocarbon Dating Conference, V 2: 408–419. Royal Soc. New Zealand, Wellington.
- Torrón, M. C., M. L. Fidalgo, G. Almendros, A. E. Gonzalez. 1996. Molecular Characterization of Alkalilignin-1M30C: a valid alternative preparation to the Björkman lignin in the analytical study of wheat straw lignin. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 10: 413–418
- Theng, B. K. G.; K. R. Tate, P. Sollins, N. Moris, N. Nadkarni, R. L. Tate. 1989. Constituents of organic matter in temperate and tropical soils, chap. 1 in Coleman, D. C.; J. M. Oades, G. Uehara, eds. Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems. NifTAL Project. University of Hawaii Press, Honolulu.
- Thomson W. H., Leege P. B., Millner P. D., Watson M. E. eds. 2002. Test methods for examination of composting and compost (TMECC on CD) U S Compost Council Research and Education Foundation. USDA, USA.
- Tisdale, S. L., W. R. Nelson. 1982. Fertilidad de suelos y fertilizantes. UTEHA, México.
- Traina, S. J., J. Novak, N. E. Smeck. 1990. An ultraviolet absorbance method of estimating the percent aromatic carbon content of humic acids. *J. Environ. Qual.* 19: 151–153
- Triano Sánchez, A. 1999. Estudio nutrimental de las plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la margen derecha del Río Seco, Comalcalco, Tabasco. Tesis, Lic. Biología, UJAT.

- UNPC, Unión Nacional de Productores de Cacao. 1990. El cacao. Ciclo Productivo 1988/89. Villahermosa, Tabasco, México.
- Uribe L., S. A. 2004 Relación entre las comunidades de lombrices terrestres (*Annelida, Oligochaeta*) y algunas propiedades físicas y químicas del suelo en cacaotales con distinto manejo en Teapa, Tabasco, México. Tesis Lic. Ecología, UJAT–DACBiol.
- U.S. EPA Report SW–846. 1996. Test Methods for Evaluating Solid Waste. Natl. Tech. Inf. Service, U. S. Dept. Commerce. Springfield, VA. USA.
- Valencia I. C. E., B. A. Hernández. 2002. Muestreo de suelos, preparación de muestras y guía de campo. UNAM FES Cuautitlán. México.
- Van Reeuwijk L. P., ed. 1999. Procedimientos para análisis de suelos. Colegio de Postgraduados, México.
- Veeken, A., K. Nierop, V. de Wilde, B. Hamelers. 1999. Characterisation of NaOH–extracted humic acids during composting of a biowaste. *Biores. Technol.* 72: 33–41.
- Voigt, J., B. Biehl, S. K. S. Wazir. 1993. The major seed proteins of *Theobroma cacao* L. *Food Chem.* 47: 145-151
- Wang, Y., D. P. Waller, A. P. S. Hikim, I. D. Russell. 1992. Reproductive toxicity of theobromine and cocoa extract in male rats. *Reprod. Toxicol.* 6: 347–353.
- Watts, C. W., W. R. Whalley, P. C. Brookes, B. J. Devonshire, A. P. Whitmore. 2005. Processes that mediate micro-aggregation of clays. *Soil Sci.* 170: 573-583.
- Weaver, C. E. 1960. Possible uses of clay minerals in search for oil. *AAPG Bull.* 44: 1505–1518.
- Wheeler, M. H. 1983. Comparisons of fungal melanin biosynthesis in ascomycetous, imperfect and basidiomycetous fungi. *Trans. British Myc. Soc.* 81: 29–36.
- Whitehouse S.A., G. J. Picos. 1984. Manual de técnicas para el análisis de los alimentos. Offsal/GSA, México.
- Wu, J., M. Wang, Y. Jiang, Y. Xu. 2005. Study on humic acids of the soil applied with corn stalk by spectroscopy measurements. *Agric. Sci. China* 09 (abstract in English). www.chinaagrisci.com ISSN: 1671-2927
- Yanes G., M. 1994. El Cacao: origen, cultivo e industrialización en Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.
- Yu, H., G. Zeng, H. Huang, X. Xi, R. Wang, D. Huang, G. Huang, J. Li. 2007. Microbial community succession and lignocelluloses degradation during agricultural waste composting. *Biodegradation* 18: 793–802.
- Zarracino I., T., I. Fraire S., H. Balboa C. 2000. Fertilización orgánica del cacao (*Theobroma cacao* L.) en el municipio de Ostuacan, Chiapas. XI Congreso Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agropecuario. Villa Ocuilzapotlán, Tabasco.
- Zhang, X., J. Wang, H. Xie, J. Wang, W Zech. 2003. Comparison of organic compounds in the particle-size fractions of earthworm casts and surrounding soil in humid Laos. *Appl. Soil Ecol.* 23: 147-153.
- <http://www.ehu.es/imacris/PIE06/web/AQ.htm>

ACRÓNIMOS

AOAC	Association Of Analytical Communities.
AWWA	American Water Works Association.
CGEP	Coordinación General de Estudios de Posgrado, UNAM.
CRTP	Centro Regional Tropical Puyacatengo, Colegio de Posgraduados Chapingo
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España.
FAO-ONU	Food and Agriculture Organization, Organización de las Naciones Unidas.
ICCO	International Cocoa Organization.
INCATABSA	Industrializadora de Cacao de Tabasco, S. A.
INECOL	Instituto Nacional de Ecología.
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
NCR	North Central Region, USDA.
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería y Recursos Pesqueros
SIGOLFO–CONACYT	Sistema regional del Golfo de México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
TMECC	Test Methods for the examination of Composting and Compost, USDA
UJAT	Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Ciencia
UNPC	Unión Nacional de Productores de Cacao
USDA	United States Department of Agriculture
US EPA	United States Environmental Protection Agency, Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. De N.A.
WRBSR	World Reference Base for Soil Resources. ISSS, ISRIC, FAO. Wageningen/Rome. Spargaaren, O. C. (editor) 1994 —versión en español: FAO, ISRIC, SICS 1999: Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. (Informes sobre recursos mundiales de suelos núm. 84)

Términos especializados:

Tsin	suelo Fluvisol Éutrico en Anacleto Canabal 4ª sección, Centro, Tabasco, tratado con lombrices.
Tcas	el suelo Tsin tratado con cascarilla de cacao y lombrices.
Tcom	el suelo Tsin tratado con composta de cascarilla y lombrices.
Rs	suelo Acrisol Húmico en el cual se sembró maíz.
Rv	el suelo Rs tratado con vermicomposta formada en el suelo Tcom.
AF	ácidos fúlvicos.
Afpvp	ácidos fúlvicos retenidos en polivinil pirrolidona.
AH	ácidos húmicos.
C/N	relación carbono-nitrógeno.
C _{AF}	proporción de carbono correspondiente a los ácidos fúlvicos.

C_{AH}	proporción de carbono correspondiente a los ácidos húmicos.
DA	densidad aparente.
DQO	demanda química de oxígeno.
DS	desviación standard (estadística).
<u>et al.</u>	locución latina que refiere a “otros colaboradores” de una obra con varios autores
fig.	figura.
FTIR	espectrofotometría en la cual se mide la radiación dentro del rango del infrarrojo que es absorbida por una sustancia y cuyos resultados se procesan mediante un algoritmo llamado Transformada de Fourier (del nombre en inglés, Fourier-Transformed Infra-Red).
HPLC	cromatografía líquida de alta eficacia
IR	Infrarrojo, en referencia a espectrofotometría o espectrogramas
L.	Linneo
<i>M</i>	molar
MO	materia orgánica
msnm	metros sobre el nivel del mar
nm	nanómetros
P	probabilidad estadística
PVP	polivinil-pirrolidona
®	marca registrada
<i>r</i>	coeficiente de correlación lineal
r^2	relación entre la varianza de x y la varianza de y , proporción de la variación de una que puede atribuirse a la otra.
RMN	resonancia magnética nuclear
sp.	especie;
spp.	especies
var.	variedad
vis	visible, en espectrofotometría
vs.	versus, contra

INDICE DE FIGURAS

Fig. 3.1 - Esquema de un árbol de cacao (4 años).	8
Fig. 3.2 - Extracción de fracciones constituyentes del humus basada en su solubilidad (Stevenson 1994).	28
Fig. 4.1 - Pila de cascarilla, posición del termómetro al medir temperatura.	66
Fig. 4.2 - Configuración de los lotes experimentales en el terreno, g de cascarilla: 6 repeticiones, distribución al azar	67
Fig. 4.3 - Efecto de vermicomposta en maíz, 1er experimento, disposición de lotes.	70
Fig. 5.1 - Cacaotal del Sr. Genárez frente al CRT Puyacatengo, Teapa.	80
Fig. 5.3 - Fracciones del C –método de Dabin– en la cascarilla y en la composta.	90
Fig. 5.4 - Curvas del espectro visible-UV de los extractos alcalinos.	91
Fig. 5.5 - espectros IR de la cascarilla y la composta (fracción AH).	92
Fig. 5.6 - espectros IR de la cascarilla (Kas) e IR de la composta (Com), fracción “ácidos fúlvicos” AF totales, y fracción adsorbida en polivinilpirrolidona AFpvp.	93
Fig. 5.7 - Maíz en macetas, tratado con extracto de cascarilla.	95
Fig. 5.8 - Efectos del extracto de cascarilla en plantas de maíz.	97
Fig. 5.9 - Proporciones de agregados en macetas con 5 lombrices y distintas dosis de cascarilla. Tamaños de agregados por diámetro.	101
Fig. 5.10 - Macetas con distintas dosis de cascarilla (en %), y micelio desarrollado (% de la superficie cubierta): sin mezclar, mezcladas.	104
Fig. 5.11 - cultivo de lombrices en bandejas.	106
Fig. 5.12 - cultivo de lombrices en lotes de 1 m ² .	107
Fig. 5.13 - Experimento con lombrices en campo, preferencia por cascarilla (color canela) o por composta (color negro).	110
Fig. 5.14 - Cultivo de maíz tratado con vermicomposta, lotes al azar.	113
Fig. 5.15 - cultivo de maíz con vermicomposta. Lotes experimentales = filas. La persona mide 1.80 m y posa junto a una planta con efecto de vermicomposta.	115
Fig. 5.16 - Proporción en el COT del CO libre y las fracciones húmicas, método Dabin.	121
Fig. 5.17 - Espectros infrarrojos de las fracciones de AH del suelo en el cual se realizó vermicomposteo, “suelo T”, rango 2000–800 cm ⁻¹ .	122
Fig. 5.18 - Espectros IR, con resolución aumentada, de la fracción AH, extractos del suelo T: sin enmienda Tsin, con cascarilla Tcas, con composta Tcom.	125
Fig. 5.19 - Espectros IR, fracción AF, del suelo T: Tsin –sin tratamiento, Tcas –tratado con cascarilla, Tcom –tratado con composta.	126
Fig. 5.20 - Espectros IR (2000 a 800 cm ⁻¹ , AF, resolución mejorada) de suelo Tsin, Tcas, Tcom. Gráficas desfasadas.	127

Fig. 5.21 - Espectros IR, 2000 a 800 cm ⁻¹ , de las fracciones adsorbidas en PVP, del suelo T.	128
Fig. 5.22.- Proporción en el COT del CO libre y las fracciones húmicas, método Dabin. Suelo R (Acrisol húmico), Rs sin vermicomposta, Rv con vermicomposta.	130
Fig. 5.23 - Espectros IR de las fracciones AH del suelo Rs y del suelo Rv. Bajo cada espectro se representa el IR de resolución aumentada.	131
Fig. 5.24 - espectros IR de resolución aumentada, fracción AF de las muestras de suelo sembrado con maíz Rs sin tratamiento y Rv con vermicomposta.	132
Fig. 5.25 - Espectros VIS (absorbancia a la luz visible).	140

INDICE DE TABLAS.

Tabla 3.1 – Composición de partes del fruto del cacao, en %.	12
Tabla 3.2 – Componentes de los cotiledones y de la cascarilla del cacao.	14
Tabla 3.3 – Frecuencia recomendada para voltear una pila.	42
Tabla 3.4 – Biodegradabilidad de algunos componentes de la cascarilla del cacao.	43
Tabla 3.5 – Tiempo de retención en distintos procesos de composteo.	47
Tabla 4.1 – Tratamientos con extracto de cascarilla (10 g·L ⁻¹ = 100%)	58
Tabla 4.2 – Tratamientos con extracto de cascarilla (10 g·L ⁻¹ = 100%)	59
Tabla 4.3 – ensayo de respuesta de lombrices a la cascarilla, en suelo	61
Tabla 4.4 – Estimación del contenido de carbono en la cascarilla de cacao.	64
Tabla 4.5 – Estimación del oxígeno necesario para el composteo de cascarilla de cacao.	65
Tabla 4.6 – longitud de onda del espectro IR y la absorbancia de grupos funcionales, en las sustancias húmicas de suelos.	78
Tabla 5.1 – Resultados de la morfología del perfil bajo el cacaotal y de las pruebas de campo	81
Tabla 5.2 – Resultados de los análisis de laboratorio, perfil bajo el cacaotal.	82
Tabla 5.3 – parámetros del composteo de las pilas: temperatura máxima alcanzada	86
Tabla 5.4 – Resultados de los análisis de la cascarilla y de la composta.	88
Tabla 5.5 – Carbono orgánico titulable de los extractos, cascarilla y composta (método Dabin).	90
Tabla 5.6 – Valores de absorbancia en el espectro visible-UV, de los extractos alcalinos de cascarilla y composta.	91
Tabla 5.7 - Valores (promedio) de la absorbancia (UA×104) por grupos significativos en los espectros IR de la fracción ácidos húmicos, para los índices: aromaticidad, siringil/guayacil.	94
Tabla 5.8- Desarrollo del maíz en macetas tratadas con distintas concentraciones de extracto de cascarilla.	95
Tabla 5.9- Resultados de los tratamientos en maceta o tiesto.	99
Tabla 5.10- tendencias de los tratamientos en maceta, mezclado o no mezclado.	100
Tabla 5.11- Agregados (suma), por tamaño y cantidad, en macetas.	102
Tabla 5.12- Desarrollo de micelio (promedio), mayor a menor.	103
Tabla 5.13- Ensayo de vermicomposteo de la cascarilla de cacao: resultados.	107
Tabla 5.14- Cultivo de lombrices en campo: lote, cantidad de cascarilla, número de lombrices al final.	108
Tabla 5.15- desarrollo de lombrices en campo, resultados agrupados.	109
Tabla 5.16- Resultados del cultivo de maíz con composta y sin composta, experimento con lotes al azar.	113
Tabla 5.17- Rendimiento de mazorcas y de semilla de maíz tratado con vermicomposta.	116
Tabla 5.18- Productividad del maíz en los surcos sin tratamiento y en aquellos con tratamiento.	117
Tabla 5.19- Características de los materiales y suelos, comparadas contra los resultados de análisis de las fracciones extraídas por el método de	118

Dabin.

Tabla 5.20- COT y CIC en el suelo en el cual se desarrolló el vermicomposteo.	119
Tabla 5.21- Caracterización del carbono orgánico (técnica de Kononova) en el suelo Tsin, Tcas, Tcom.	120
Tabla 5.22- Valores de la absorción (UA×104) por grupos significativos. Resumen de los resultados en los espectros IR de la fracción ácidos húmicos.	123
Tabla 5.23- Carbono oxidable en las distintas fracciones, técnica de Dabin, suelo R.	129
Tabla 5.24- Contenidos de carbono orgánico total (COT) y nitrógeno en los materiales y suelos.	135
Tabla 5.25- Nitrógeno total y absorbancia de los AH al infrarrojo (UA×104; fracción de los grupos nitrogenados) de los suelos y materiales.	137
Tabla 5.26- Nitrógeno total de los materiales y de los suelos, comparados con la intensidad (UA×104) de las bandas en los espectros infrarrojos (en fracciones de AF) de los grupos nitrogenados.	138
Tabla 5.27- Absorbancia en el espectro de luz visible de los AH.	139