



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

ROTACIÓN DE CULTIVOS FORRAJEROS
DE CLIMA TEMPLADO Y
CALIDAD DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

Laboratorio de Fertilidad de Suelos
Departamento de Suelos
Universidad Autónoma Chapingo

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

PRESENTA:

Claudia Bautista Escobedo

Director de tesis: Dra. Maria Edna Álvarez Sánchez
Universidad Autónoma Chapingo

Asesor interno: Dr. Gerardo Cruz Flores;
FES-Zaragoza UNAM



MÉXICO D.F. ABRIL DE 2009



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.

DEDICATORIA

Primero que nada esta tesis se la dedico a diosito por haberme dejado llegar hasta esta última etapa en la que concluyo mi carrera profesional a nivel licenciatura, por todas las gracias y bendiciones que me concede día con día. Y porque me deje continuar avanzando y creciendo para bien.

A todos y cada uno de los miembros de mi familia que me han apoyado incondicionalmente en cada actividad que desempeño; mi madre, mis tías y tíos, que con sus valores y virtudes y porque no, también con sus defectos me enseñan algo todos los días; todas esas cosas me hacen un mejor ser humano y desde siempre me han enseñado que la mejor herencia que me pueden dejar es esta.

También se la dedico a los seres que ya no se encuentran conmigo pero que los recuerdo con cariño, a los abuelito (Mariano, Celsa, Pedro y Miguel) que aunque no los conocí a todos, son los pilares de esta familia; no los olvido. Como tampoco voy a olvidarte Tía Mago aunque no estés presente físicamente yo se que me sigues viendo desde el cielo y hasta allá te mando mis agradecimientos, en vida me diste lo mejor de ti y eso es algo que no se podrá comparar con nada.

También a mis amigos, Nadia, Rafa Arturo Belem y que recordando lo bueno y lo malo y la forma en como nos conocimos, demostró que si somos amigos y de los buenos.

Y por todos esto mil gracias.

Atte:

Claudia

AGRADECIMIENTOS

FEZ Zaragoza UNAM, facultad que me brindó la oportunidad de formarme como Biólogo y a todos y cada uno de los maestros que desde el primer semestre me enseñaron con lo que más tarde pondré en práctica. MIL GRACIAS; por dejarme formar parte de tu matrícula.

A la Dra. Maria Edna Álvarez Sánchez por ser mi directora de tesis, por sus conocimientos que hicieron posible este trabajo y por sus consejos.

Al profesor, Dr. Gerardo Cruz Flores, usted me apoyó muchísimo en mi formación (de principio a fin), me brindó el resto de las herramientas que hicieron me interesara aún más en la edafología.

A la M. en C. Lourdes Castillo Granada por el tiempo dedicado a los Espectros de Infrarrojo en su elaboración e interpretación GRACIAS.

Al profesor M. en C. Ramiro Ríos Gómez, usted también contribuyó en mucho a mi formación, no sólo al ser mi profesor sino también al brindarme su apoyo, además de que fue el primero en inducirme hacia la EDAFLOGÍA.

A la Dra. Herlinda Montiel, a la M. en C. Esther Mata, del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UAM por el apoyo y asesoramiento de la técnica de Espectroscopia de Infrarrojo

Al jurado examinador M. en C. Efraín Ángeles Cervantes, Q. Martha T. Julieta Oliveros García y M. en C. Miguel Castillo González por sus observaciones que siempre fueron positivas hacia el trabajo elaborado.

A la Biol. Angélica Marín por la colaboración en el trabajo de laboratorio.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

ROTACIÓN DE CULTIVOS FORRAJEROS
DE CLIMA TEMPLADO Y
CALIDAD DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

Laboratorio de Fertilidad de Suelos
Departamento de Suelos
Universidad Autónoma Chapingo

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

PRESENTA:

Claudia Bautista Escobedo

Director de tesis: Dra. Maria Edna Álvarez Sánchez
Universidad Autónoma Chapingo

Asesor interno: Dr. Gerardo Cruz Flores;
FES-Zaragoza UNAM



MÉXICO D.F. ABRIL DE 2009

DEDICATORIA

Primero que nada esta tesis se la dedico a diosito por haberme dejado llegar hasta esta última etapa en la que concluyo mi carrera profesional a nivel licenciatura, por todas las gracias y bendiciones que me concede día con día. Y porque me deje continuar avanzando y creciendo para bien.

A todos y cada uno de los miembros de mi familia que me han apoyado incondicionalmente en cada actividad que desempeño; mi madre, mis tías y tíos, que con sus valores y virtudes y porque no, también con sus defectos me enseñan algo todos los días; todas esas cosas me hacen un mejor ser humano y desde siempre me han enseñado que la mejor herencia que me pueden dejar es esta.

También se la dedico a los seres que ya no se encuentran conmigo pero que los recuerdo con cariño, a los abuelito (Mariano, Celsa, Pedro y Miguel) que aunque no los conocí a todos, son los pilares de esta familia; no los olvido. Como tampoco voy a olvidarte Tía Mago aunque no estés presente físicamente yo sé que me sigues viendo desde el cielo y hasta allá te mando mis agradecimientos, en vida me diste lo mejor de ti y eso es algo que no se podrá comparar con nada.

También a mis amigos, Nadia, Rafa Arturo Belem y que recordando lo bueno y lo malo y la forma en como nos conocimos, demostró que si somos amigos y de los buenos.

Y por todos esto mil gracias.

Atte:

Claudia

AGRADECIMIENTOS

FEZ Zaragoza UNAM, facultad que me brindó la oportunidad de formarme como Biólogo y a todos y cada uno de los maestros que desde el primer semestre me enseñaron con lo que más tarde pondré en práctica. MIL GRACIAS; por dejarme formar parte de tu matrícula.

A la Dra. Maria Edna Álvarez Sánchez por ser mi directora de tesis, por sus conocimientos que hicieron posible este trabajo y por sus consejos.

Al profesor, Dr. Gerardo Cruz Flores, usted me apoyó muchísimo en mi formación (de principio a fin), me brindó el resto de las herramientas que hicieron me interesara aún más en la edafología.

A la M. en C. Lourdes Castillo Granada por el tiempo dedicado a los Espectros de Infrarrojo en su elaboración e interpretación GRACIAS.

Al profesor M. en C. Ramiro Ríos Gómez, usted también contribuyó en mucho a mi formación, no sólo al ser mi profesor sino también al brindarme su apoyo, además de que fue el primero en inducirme hacia la EDAFOLOGÍA.

A la Dra. Herlinda Montiel, a la M. en C. Esther Mata, del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UAM por el apoyo y asesoramiento de la técnica de Espectroscopia de Infrarrojo

Al jurado examinador M. en C. Efraín Ángeles Cervantes, Q. Martha T. Julieta Oliveros García y M. en C. Miguel Castillo González por sus observaciones que siempre fueron positivas hacia el trabajo elaborado.

A la Biol. Angélica Marín por la colaboración en el trabajo de laboratorio.



ÍNDICE	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE CUADROS	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
ABREVIATURAS	ix
RESUMEN	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Concepto de calidad del suelo	3
2.2 Materia orgánica y su composición	8
2.2.1 Sustancias húmicas	11
2.2.1.1 Funciones de las sustancias húmicas	19
2.2.1.2 Formación de sustancias prehúmicas	21
2.2.1.3 Fórmula estructural de las sustancias húmicas	22
2.3 Calidad de la materia orgánica	23
2.4 Función de la materia orgánica en el suelo	26
2.5 Influencia de la rotación de cultivos e incorporación de residuos en el contenido de materia orgánica	27
2.6 Otros factores que influyen en el contenido de materia orgánica	30
2.6.1 Organismos	30
2.6.2 Clima	30
2.6.3 Geomorfología	31
2.6.4 Humedad	31
2.6.5 Temperatura	31
2.6.6 Nutrientes	31
2.6.7 Excretas de ganado	32
2.6.8 Minerales del suelo	35
2.6.9 Material parental	36
2.6.10 pH	36
2.6.11 Presencia de sustancias inhibidoras	36
2.7 La espectroscopia ultravioleta, visible y de infrarrojo para la caracterización de la materia orgánica	36
2.7.1 Espectroscopia ultravioleta y visible	37
2.7.2 Espectroscopia de infrarrojo	37
3. JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS E HIPÓTESIS	40
4. MATERIALES Y MÉTODO	43
4.1 Descripción de la zona	43
4.2 Diseño de tratamientos y experimental	43
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
5.1 Características químicas del suelo	47
5.2 Condiciones del clima y suelo	48
5.3 Cantidad y calidad de los residuos orgánicos incorporados	50





5.4 Efecto de la rotación de cultivos en el contenido de materia orgánica en el suelo	53
5.5 Efecto de la rotación de cultivos en la calidad de la materia orgánica	57
5.6 Grado de condensación de los ácidos húmicos y fúlvicos	61
5.7 Grupos funcionales presentes en la fracciones húmicas	64
5.7.1 Ácidos húmicos	64
5.7.2 Ácidos fúlvicos	68
6. CONCLUSIONES	71
7. LITERATURA CITADA	74
8. ANEXO	84
ANEXO A. Técnicas de análisis de suelos. Extracción de ácidos húmicos y fúlvicos	84
ANEXO B. Caracterización por espectroscopia de IR	85
ANEXO C. Determinación de la relación E4/E6. Metodología descrita por Stevenson (1994) (citado por Dos Santos, 2003)	86
ANEXO C.' Modificación a la técnica de Stevenson (1994)	86
ANEXO D. Determinación de materia orgánica. Método de Walkley & Black (Jackson, 1964)	88
ANEXO E. Probabilidad de la diferencias en las comparaciones de medias de materia orgánica	89
ANEXO F. Probabilidad de la diferencias en las comparaciones de ácidos fúlvicos	92
ANEXO G. Probabilidad de la diferencias en las comparaciones de ácidos húmicos	96
ANEXO H. Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias de la suma de los contenidos de ácidos húmicos y fúlvicos	99
ANEXO I. Álbum fotográfico	103
I.1. Procedimiento para la extracción de ácidos húmicos y fúlvicos	103
I.2. Lectura en el espectro de ultravioleta y luz visible para la determinación de la relación E4/E6	104
I.3. Diseño de tratamientos	105
I.4. Módulo de Producción de Leche en Pastoreo (UACH)	105





ÍNDICE DE FIGURAS	Página
FIGURA 1 Principales componentes de la calidad del suelo	4
FIGURA 2 Representación gráfica del concepto de calidad del suelo utilizando funciones del suelo e indicadores de calidad del suelo	6
FIGURA 3 Esquema simplificado de la transformación de la materia orgánica “fresca”	9
FIGURA 4 Fraccionamiento de la materia orgánica por métodos analíticos clásicos	12
FIGURA 5 Esquema de la formación de sustancias húmicas	14
FIGURA 6 Transformación y evolución hasta sustancias húmicas de la fracción orgánica en el suelo	21
FIGURA 7 Estructura hipotética del ácido húmico	23
FIGURA 8 Espectro electromagnético	38
FIGURA 9 Esquema de la combinación de los tratamientos y usos del suelo	45
FIGURA 10 Contenido de materia orgánica del suelo en la profundidad (a) 0-30 cm y (b) 30-60 bajo diferentes rotaciones en tres momentos del año.	53
FIGURA 11 Comportamiento del grado de condensación de los ácidos húmicos y fúlvicos durante el desarrollo de las rotaciones.	63
FIGURA 12 Espectro en el IR de los ácidos húmicos presentes en el suelo en la profundidad 0 a 30 y 30 a 60 cm al inicio del experimento.	65
FIGURA 13 (a, b, c). Espectro en el IR de los ácidos húmicos presentes en el suelo en la profundidad 0 a 30 y 30 a 60 cm al término de las rotaciones	66-67
FIGURA 14 Espectro en el IR de los ácidos fúlvicos presentes en el suelo en la profundidad 0 a 30 y 30 a 60 cm al inicio del experimento.	69
FIGURA 15 Espectro en el IR de los ácidos fúlvicos presentes en el suelo en la profundidad 0 a 30 y 30 a 60 cm al término de las rotaciones.	70





ÍNDICE DE CUADROS	Página
CUADRO 1 Composición media de distintos organismos vegetales y materia orgánica del suelo	8
CUADRO 2 Clasificación del humus de acuerdo al régimen hídrico y al tiempo de descomposición de sus componentes	13
CUADRO 3 Propiedades químicas generales de los ácidos húmicos y fúlvicos	17
CUADRO 4 Relación carbono-nitrógeno de diversas materias orgánicas	29
CUADRO 5 Composición media de diferentes estercolados generados en Cataluña	33
CUADRO 6 Valores promedio de nitrógeno excretado a través de la orina de las vacas	35
CUADRO 7 Principales características químicas del suelo	47
CUADRO 8 Principales características físicas del suelo	48
CUADRO 9 Residuos orgánicos incorporados al suelo al término de la rotación y características químicas de los residuos.	50
CUADRO 10 Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias de materia orgánica evaluada a dos profundidades en diferentes rotaciones en tres fechas de muestreo.	56
CUADRO 11 Contenido de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos y total de sustancias húmicas en el suelo a dos profundidades, derivados de tres rotaciones de cultivos	57
CUADRO 12 Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias de la suma de los contenidos de ácidos húmicos y fúlvicos evaluados a dos profundidades en tres rotaciones de cultivos forrajeros en distintas fechas de muestreo.	58
CUADRO 13 Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias del contenido de ácidos húmicos evaluado a dos profundidades en tres rotaciones de cultivos forrajeros en diferentes fechas de muestreo.	60
CUADRO 14 Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias del contenido de ácidos húmicos evaluado a dos profundidades en tres rotaciones de cultivos forrajeros en diferentes fechas de muestreo.	61
CUADRO 15 Grado de condensación de los ácidos húmicos y fúlvicos en rotación de cultivos	62





ABREVIATURAS

	AVREVIATURA
Ácidos húmicos	AH
Ácidos fúlvicos	AF
Calidad del suelo	CS
Calidad de la materia orgánica	CMO
Espectroscopia de infrarrojo	IR
Humus	H
Materia orgánica	MO
Materia orgánica fresca	MOF
Materia orgánica humificada	MOH
Pradera-Pradera-Pradera	P-P-P
Pradera-Maíz-Avena	P-M-A
Pradera-Pradera-Avena	P-P-A
Sustancias Húmicas	SH



RESUMEN

Con el objetivo de evaluar el efecto de la diversidad de residuos derivados de diferentes rotaciones de cultivos forrajeros de clima y templado, en la cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo se condujo un experimento de abril de 2005 a abril de 2006 en el “Módulo de Producción de Leche en Pastoreo” en el campo experimental de la UACH en el Estado de México. El suelo clasificado como Argiustoll Vértico profundo y negro cultivado con una pradera mixta de alfalfa+ovillo de dos años y medio de establecida, fue sometido a diferentes tratamientos de rotación de cultivos: (a) Pradera de alfalfa+ovillo de dos años y medio, un ciclo de maíz y un ciclo de avena+raigrás anual (P-M-A), (b) Pradera de alfalfa+ovillo de tres años y un ciclo de avena+raigrás anual (P-P-A) y (c) Pradera de alfalfa+ovillo de tres años y medio (P-P-P). Los tratamientos de rotación fueron distribuidos en un diseño de bloques al azar con tres repeticiones en unidades experimentales de 162 m². Se evaluó la cantidad de residuos y de nitrógeno incorporado después de cada ciclo de cultivo mediante la extracción de monolitos de suelo. Para evaluar la cantidad y calidad de la materia orgánica (MO) derivada de la descomposición de los residuos de cosecha se colectaron muestras de suelo a las profundidades 0 a 30 cm y 30 a 60 cm al término de cada ciclo de cultivo y se les determinó el contenido de materia orgánica, los contenidos de ácidos húmicos (AH) y fúlvicos (AF), el grado de condensación aromática de éstos (relación E4/E6) y la determinación de los grupos funcionales presentes, a través de espectroscopia de Infrarrojo con transformadas de Fourier (TF-IR).

La rotación de cultivos que proporcionó la mayor cantidad de residuos orgánicos correspondió a P-M-A con 22200 kg MS ha⁻¹, seguida por la de P-P-A con 17700 kg MS ha⁻¹ y la de P-P-P con 13300 kg MS ha⁻¹. De los tres cultivos, la pradera de alfalfa+ovillo (P) fue la que generó la mayor cantidad de biomasa de residuos (13300 kg ha⁻¹). La MO en el suelo en la profundidad 0 a 30 cm no fue función de la cantidad de residuos ni del nitrógeno total incorporado a través de las diferentes rotaciones, si embargo, hubo efecto significativo en el contenido de MO en la profundidad 30 a 60 cm del segundo muestreo al término de la rotación, el cual se incrementó de 1.23% (en las

rotaciones P-P-P y P-M-A) a 1.72% con la rotación P-P-A, atribuyéndose a una mayor incorporación de residuos que en P-P-P y a un menor efecto de laboreo que en P-M-A.

Independientemente del tipo de rotación, el grado de condensación de los ácidos húmicos y fúlvicos en la profundidad 0 a 30 cm disminuyó al término de la rotación, indicando mayor contenido de cadenas alifáticas, sin embargo, con P-P-A la velocidad de disminución para los ácidos húmicos fue menor (0.320 unidades d^{-1}) que en P-P-P (0.65 unidades d^{-1}) y que en P-M-A (0.798 unidades d^{-1}). Respecto a los grupos funcionales encontrados en los ácidos húmicos presentes en el suelo tanto al inicio como al término de las rotaciones a la profundidad 0 a 30 cm las señales indicaron la presencia de $-N-H$; de $-O-H$ de alcohol y fenol; enlaces de CH , CH_2 y CH_3 de tipo alifático, así como la presencia de doble enlaces de tipo alifático y de sales de amonio aromáticas $=C-NH^+$; señales características de la vibración de deformación del enlace $-C-O-H$ de fenoles y de alcoholes. También se identificó una señal que puede tener su origen por la presencia de dobles enlaces del tipo alqueno. Los mismos grupos funcionales fueron identificados en la profundidad 30 a 60 cm. El análisis de los espectros de los ácidos fúlvicos al término de la rotación en ambas profundidades, fueron muy similares, observándose señales que indicaron la presencia de $-O-H$ de alcoholes y fenoles, de cadenas alifáticas (CH_3 , CH_2 , CH : alcanos), de alargamiento del doble enlace $C=C$. También se comprobó la presencia del enlace $-C-O-$ para fenoles, de alcoholes terciarios y alcoholes secundarios. La ausencia de señales que permitieran identificar los grupos funcionales del ácido carboxílico y fenol típicos del humus en los aislados de ácidos húmicos y fúlvicos del suelo derivados de diferentes rotaciones de cultivo, es indicativo de un proceso de humificación que no ha concluido. Por otra parte, la profundidad no influyó en la formación de grupos funcionales diferentes.

1. INTRODUCCIÓN

La materia orgánica, es un amplio conjunto de compuestos de carbono en el suelo, originalmente derivados de plantas, microorganismos y otros organismos presentes en el mismo. El contenido de materia orgánica es uno de los factores más importantes que determinan la productividad de los suelos por los múltiples efectos de las sustancias húmicas, entre las que pueden citarse la liberación de nutrientes, el mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, prevención de la erosión, incremento en la eficiencia de los fertilizantes aplicados y en la protección ambiental (Young, 1991). Razones que han identificado a la materia orgánica como un indicador de la calidad del suelo y también como un componente clave de la producción sustentable de los cultivos (Labrador, 1996).

Los tipos de cultivos (cultivos en hilera, cereales y leguminosas) y las prácticas agronómicas que incluyen las labores de labranza, rotación de cultivos, la cantidad y características de los residuos vegetales que permanecen en el suelo después de la cosecha (contenido de nitrógeno y lignina, relación C:N), modifican la composición y el contenido de la materia orgánica del suelo. Estudios realizados sobre la cantidad y calidad de la materia orgánica derivada de la rotación de cultivos indican que al término de ésta, la predominancia de ácidos húmicos sobre los fúlvicos, el grado de condensación de cada grupo así como la naturaleza, reactividad y el arreglo estructural de los grupos funcionales que contienen oxígeno determinan el grado de estabilidad del humus y con ello la calidad de la materia orgánica (Bures, 2008).

En los sistemas de producción de leche a base de cultivos forrajeros en condiciones de pastoreo, las rotaciones de cultivos presentan numerosas ventajas comparadas con los sistemas de monocultivo. Algunas de estas ventajas se relacionan con la posibilidad de acumular mayor cantidad de residuos de distinta calidad que representan significativos aportes de C para el suelo, con una mayor intensidad de uso del suelo y con una mayor eficiencia de uso del agua (García, 2004).

Sin embargo es necesario determinar qué rotación de cultivos es la más apropiada, por lo tanto, el contenido y la calidad de la materia orgánica puede ser un buen criterio en términos de sustentabilidad del sistema de producción. Por ello, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la diversidad de residuos derivados de diferentes rotaciones de cultivos forrajeros de clima templado de un sistema de producción de leche, en la cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo.



2. MARCO TEÓRICO

2.1 Concepto de calidad del suelo

La calidad y salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerados sinónimos. Sin embargo este concepto ha sido percibido de muchas formas desde que se popularizó a finales del siglo XX (León, 2007).

Se desarrolló en los años 90's por lo que en la actualidad es aceptado internacionalmente por la ciencia edafológica y tiene como base dos factores:

1.- Sus propiedades inherentes y dinámicas.

2.-La evaluación de los procesos físicos, químicos, biológicos y sus interacciones (Douglas *et al.*, 2003)

El término calidad del suelo (CS) se empezó a acotar al reconocer las funciones del suelo: (1) promueve la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible); (2) atenúa contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); y (3) favorece la salud de plantas, animales y humanos (Doran y Parkin; 1994; Karlen *et al.*, 1997) (Figura 1). Al desarrollar este concepto, también se ha considerado que el suelo es el substrato básico para las plantas; capta, retiene y emite agua; y es un filtro ambiental efectivo (Boul, 1995). En consecuencia, este concepto refleja la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema del cuál forma parte y con el que interactúa (Parr *et al.*, 1992)



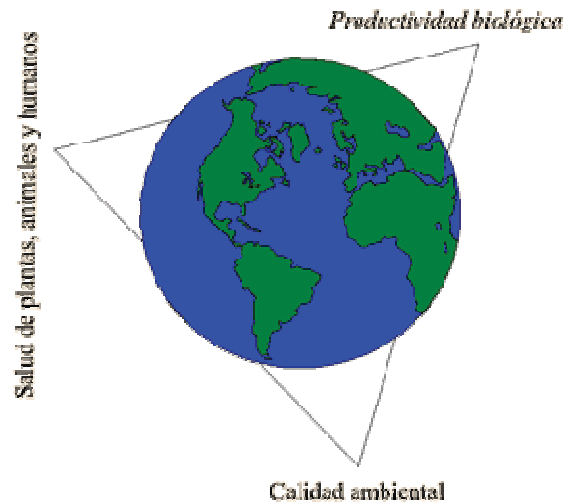


Figura 1. Principales componentes de la calidad del suelo (Doran y Parkin 1994)

De acuerdo con el Webster's Third New Internacional Dictionary (1986 citado por Bautista, 2001), la palabra calidad se deriva del latín *qualitas*, y significa de que tipo y se define como propiedades o atributos inherentes que pueden referir una cualidad o característica distintiva usada para describir una especie.

La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo contribuyó al desarrollo del concepto de CS, cuando en 1994 un comité de 14 personas definieron el concepto, es así como Karlen *et al*, (1997) lo define como la capacidad de un suelo de funcionar dentro de los límites del ecosistema, sosteniendo la productividad de la flora y la fauna, manteniendo la calidad del aire, el agua y la salud humana.

Para hablar de CS primero nos debemos preguntar ¿Qué es un indicador de calidad del suelo?; esta pregunta es importante ya que de ellos va a depender su evaluación. Según Moscatelli¹ (2005), los indicadores son parámetros que sirven para evaluar diversas propiedades con diferente sensibilidad, los cuales después de ser establecidos deben tener una escala de valoración para interpretar el valor obtenido.

¹ Ex - director del Instituto de Suelos del INTA cautelar en Argentina y actual director de su área AICET (Área de Investigación, Cartografía y Evaluación de Tierras),





Cabe señalar que para que un suelo pueda ser evaluado, se deben seleccionar una serie de indicadores que ayuden a tal acción. A veces los pobladores, para estimar la CS se basan en sus propios indicadores de calidad o en el estado fitosanitario de sus cultivos, al reconocer malezas, algunos organismos o el color de las hojas el cual representa el estado nutricional de la planta. Pero cada localidad tiene sus indicadores específicos, que cambian de acuerdo al conocimiento de los pobladores o a las condiciones de la localidad. En la Figura 2 se describe una serie de pasos para evaluar la CS, con base en un conjunto de atributos interactivos más que en una calidad absoluta; las cinco funciones definen la capacidad de un suelo para funcionar, mientras las propiedades cuantificables indican el nivel de funcionamiento del suelo.





Figura 2. Representación gráfica del concepto de calidad del suelo utilizando funciones del suelo e indicadores de calidad del suelo (Seybold *et al.* 1997; citado en Bautista, 2001)

A menudo se reconocen sólo los resultados positivos de ciertos indicadores, tales como el contenido de materia orgánica y la cantidad de lombrices, o sólo los negativos





de aspectos como la salinidad o la compactación. Así la materia orgánica proporciona muchos beneficios al suelo, pero también puede tener impactos negativos ambientales y agrícolas, rara vez considerados en la evaluación de la calidad edáfica. Al incrementarse la materia orgánica se deben aumentar las dosis de aplicación de muchos pesticidas, lo que conlleva obvias repercusiones negativas económicas, ambientales y de salud. Otro ejemplo de efectos negativos, escasamente reconocidos en el contexto de la calidad edáfica, es la cantidad de lombrices. Por una parte, incrementan el flujo y movimiento rápido de contaminantes aplicados superficialmente hacia el subsuelo y actúan como vectores de enfermedades vegetales (Sojka y Upchurch, 1999).

En este sentido, el medir la salud del suelo permite saber "cómo y cuanto se ha modificado la calidad originaria como consecuencia del uso productivo del suelo".

Específicamente, permiten realizar un diagnóstico certero, basado en conocimiento científico, permitiendo conocer el impacto de las diferentes prácticas agrícolas y su impacto en la sustentabilidad ambiental (Moscatelli, 2005)

La CS debe definirse en términos de distintos manejos y condiciones ambientales específicas, bajo circunstancias específicas para cada uso determinado. Las condiciones incluyen juicios de valor social, económico y biológico, entre otros. Solamente, una mezcla compleja de juicios científicos y no científicos podría decidir el balance de las funciones necesarias para evaluar la CS. Aún, en el contexto productivo, la calidad es indefinible para sistemas complejos tan diversos como los suelos. Dumanski *et al* (1998 citado por Bautista, 2001); sostiene que es necesario contar con descriptores que representen fielmente los cambios y tendencias (indicadores), los cuáles deben ser usados para monitorear y evaluar los programas, pero que dichos descriptores no puede ser un grupo seleccionado *ad hoc* para cada situación particular, sino que debe ser idéntico en cada caso, con el propósito de poder hacer comparaciones a nivel nacional e internacional que sean válidas.

2.2 Materia orgánica y su composición





Los horizontes superficiales de suelos sometidos al laboreo, suelen contener entre 1% y 3% de materia orgánica (MO) pero este contenido es, con frecuencia, más elevado en suelos de pradera y forestales, especialmente si tienen un drenaje insuficiente (Wild *et al.*, 1992).

Se estima que la composición de la MO (Cuadro 1) en el medio suelo estaría definida por; un 10% de carbohidratos; un 10% de compuestos nitrogenados – incluyendo proteínas péptidos, aminoácidos, aminoazúcares, purinas, pirimidinas y otros compuestos-; un 15% de ceras, grasas, resinas, etc., y un 65% de sustancias húmicas (SH) (la MO estable del suelo está conformada, en general, por moléculas de alto peso molecular como los ácidos húmicos (AH), y moléculas de bajo peso molecular como los ácidos fúlvicos (AF) (Rivero *et al.* 1994). Evidentemente estos porcentajes son variables y altamente dependiente de muchos factores externos e internos (Schnitzer, 1990).

Cuadro 1. Composición media de distintos organismos vegetales y materia orgánica del suelo

Organismos	Ceras, grasas, resinas	Proteínas	Celulosa	Hemicelulosa, carbohidratos	Ligninas derivados	Relación C:N
Leguminosas herbáceas perennes:						
Raíces.....	10-12	10-15	20-25	25-30	10-15	-
Hojas.....	-	12-20	15	10-12	5	12-16
Gramíneas perennes:						
Raíces.....	5-12	5-10	25-30	25-30	15-20	15-20
Bacterias.....	-	40-70	-	Mucosidad	-	8-12
Musgos.....	-	5-10	15-25	30-60	No	-
Algas.....	-	10-15	5-10	50-60	-	-
Materia orgánica suelos.....	0.8-7.7	30-35	3-5	5-12	30-50	8-15

La materia orgánica del suelo (MOS) (fracción no-viva de componentes orgánicos) es un todo heterogéneo donde la producción de formas estables de la misma es el resultado de una serie de reacciones de orden físico, químico y biológico, de





carácter complejo (Figura 3) (Rivero *et a.*, 1994). Según la Soil Science Society of America la MOS debe definirse como: la fracción orgánica del suelo que incluye vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del mismo, los cuales se acumulan en la rizosfera (Cepeda, 1991)

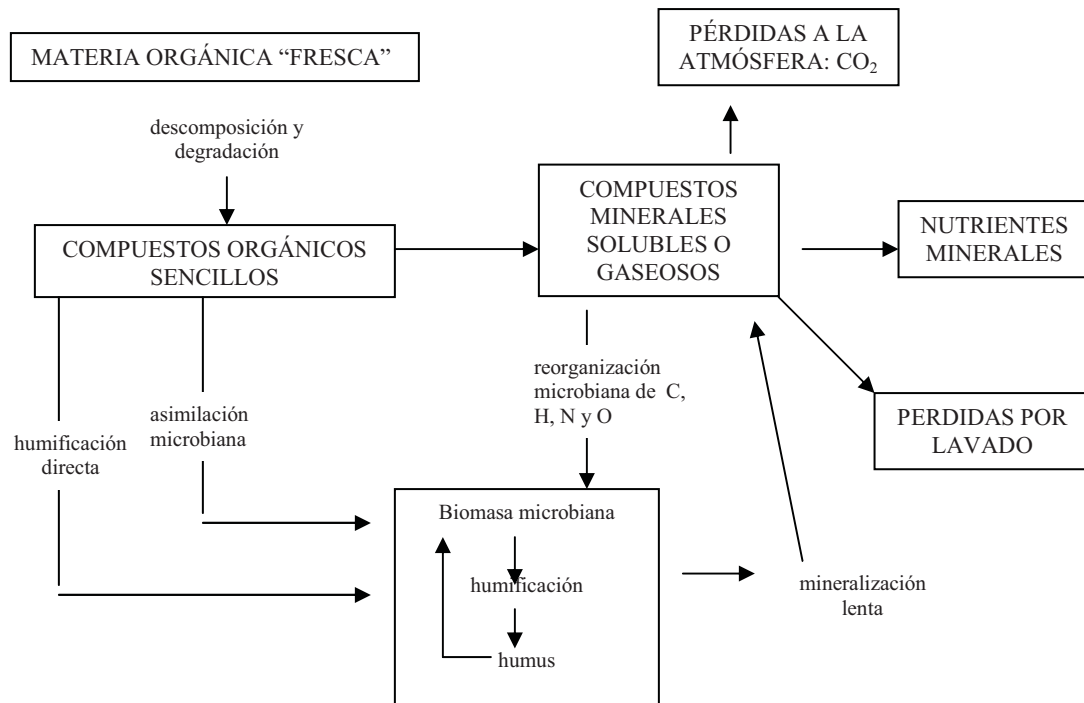


Figura 3. Esquema simplificado de la transformación de la materia orgánica “fresca”

La fuente originaria de la MO y del humus del suelo, son los restos de animales y especialmente los vegetales que se depositan en el mismo. Los productos orgánicos resultantes constituyen la fracción de la MO no alterada, que a través del proceso de humificación (síntesis) producen nuevos compuestos que se denominan fracción orgánica del suelo (De Brito, 2004).

Estos restos tan dispares, que la bioquímica define como “polímeros de compuestos orgánicos” y que podemos denominar “materia orgánica fresca” (MOF) bajo la acción de factores edáficos, climáticos y biológicos, serán sometidos a un constante proceso de transformación; estos restos serán en la primera etapa, degradados





y despolimerizados por vía biológica hasta los componentes elementales de sus constituyentes básicos: proteínas, hidratos de carbono, ácidos orgánicos complejos, etc., es decir se produce una simplificación de su estructura a compuestos más “sencillos” y en general más solubles. Parte de estos compuestos sufren, por acción microbiana, un proceso de mineralización, pasando a formas inorgánicas, bien solubles (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , etc.) o gaseosas (CO_2 y NH_4^+) (Labrador, 1996).

La fracción de la MO que no se mineraliza en esta primera etapa, a través del proceso que denominaremos humificación, es sometida a diversas reacciones químicas y bioquímicas, de resíntesis y polimeración, que dará lugar a nuevos productos –macromoléculas más o menos policondensadas-, que reciben el nombre de sustancias húmicas y que presentan propiedades y características diversas.

En materia agrícola es indispensable hacer la distinción entre MOF (restos de cultivo, abono verde, abono orgánico) y la MO transformada, “humificada”. Cuando se incorpora al suelo MOF se observa que del 60 al 70% de su masa desaparece en un intervalo de dos años (fase de mineralización activa); luego, los compuestos humificados que quedan son mucho más estables y se mineralizan lentamente, al ritmo del 1.5 al 2% por año (Hénin y Dupuis, 1945; citado por Duchaufour *et al.*, 1975).

Así, la fracción orgánica del suelo la podemos dividir en dos grupos, teniendo presente su grado de complejidad. Un primer grupo denominado “materia orgánica fresca” (MOF) o “materia orgánica lábil” que está formada por restos animales, plantas y microorganismos, transformados de forma incompleta, que son la primera fuente de humus y que no forman parte integral del suelo, pudiendo ser separados mediante métodos mecánicos mayormente. Y el segundo grupo denominado “materia orgánica transformada” o “materia orgánica estable” que incluye dos subgrupos, uno constituidos por productos resultantes de la descomposición avanzada de residuos orgánicos y

síntesis microbiana y otro, que podemos considerar exclusivamente SH, que forman parte integral del suelo y que no pueden ser separados por métodos mecánicos (Labrador, 1996).

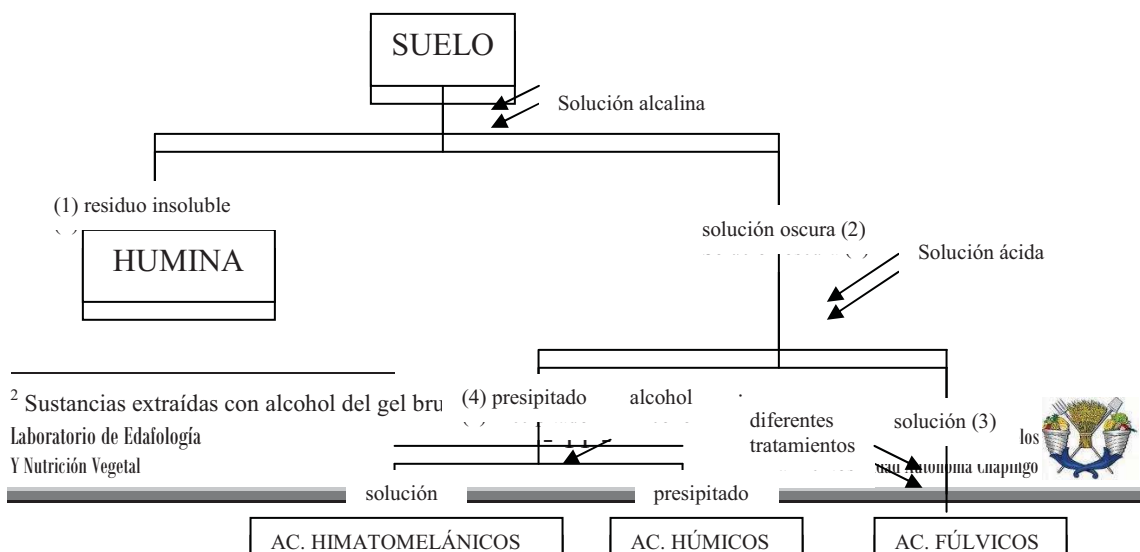
2.2.1 Sustancias húmicas





Humus: El proceso de humificación no sólo engloba la transformación de los productos originados por la descomposición de las moléculas de alto y bajo peso molecular procedentes de tejidos de plantas superiores, animales y constituyentes celulares microbianos, sino también a la síntesis molecular de estos compuestos, las cuales tendrán acciones directas e indirectas sobre la vida vegetal y la dinámica del suelo (González, 2006).

Si al hablar de MO nos referimos a compuestos de origen orgánico que se superponen al suelo mineral -medios naturales- o se incorporan él – medios cultivados-; con el término humus (H) designamos a la fracción humificada (conjunto heterogenos de sustancias muy polimerizadas, de peso molecular relativamente alto, de color oscuro con propiedades coloidales e hidrofílicas marcadas, que presentan alta capacidad de intercambio iónico), que incluye los productos de descomposición avanzada de los residuos orgánicos transformados por vía biológica, otros productos procedentes de procesos físico-químicos y los sintetizados por los microorganismos (Figura 4). Un concepto más restringido al anterior sería el de sustancias húmicas, que abarca componentes más concretos, como los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, himatomelánicos² y huminas (Labrador, 1996).





- (1) Humina+ material mineral + MOF
- (2) Fracción de ácidos húmicos + ácidos fúlvicos
- (3) Fracción de ácidos fúlvicos + aminoácidos + azúcares sencillos
- (4) Fracción de ácidos húmicos

Figura 4. Fraccionamiento de la materia orgánica por métodos analíticos clásicos

Walksman, (1936; citado por González, 2006) advierte que “ciertos intentos de división del H, sobre las bases de su utilización práctica puede ser en gran parte artificial”. Independientemente de quien tiene razón, la escuela anglosajona optó por la prudencia de Walksman, y manejó, hasta hace pocos años, “suelo activo” (una fracción de tamaño inferior a 2mm), que contiene simultáneamente la materia orgánica humificada (neomasa³) y el resto de los materiales orgánicos en su “totalidad” (biomasa, necromasa, secreciones y copromasa). Frente a los franceses, los anglosajones nunca pretendieron obtener los compuestos húmicos de los complejos organo-minerales *in sensu stricto* (González, 2006).

El humus posee características propias, como son:

- No se puede identificar el material vegetal o animal del que proceden
- No contienen productos orgánicos como azúcar, fibra, celulosas, lignina, proteínas, etc. y no se hallan en los organismos vivos.

³ El autor llama neomasa a la materia orgánica humificada, para diferenciarla de secreciones, biomasa, necromasa y copromasa, y de los materiales orgánicos aportados, pero no integrados en el suelo.





- No pueden descomponerse más (León, 2007)

En estado natural todas estas sustancias están íntimamente ligadas unas con otras y con otros constituyentes orgánicos (hidratos de carbono, proteínas, etc.) y el papel de los distintos componentes del H es difícil de determinar. De hecho, las diferentes fracciones húmicas representan un sistema de polímeros que varían en cuanto a su composición elemental, acidez, grado de polimerización y peso molecular (Bures, 2008)

Por lo tanto el H es considerado la fracción más o menos estable de la MOS; y puede clasificarse de acuerdo a tres criterios generales:

- * Por su morfología
- * Por su forma en la naturaleza
- * Por su composición química

Los tipos de H generados dependerán del tipo de vegetación y de la acción de los microorganismos presentes. Esto los hace específicos para cada tipo de lugar. Por lo que también pueden clasificarse de acuerdo al régimen hídrico y al tiempo de descomposición de sus componentes (Cuadro 2):

Cuadro 2. Clasificación del humus de acuerdo al régimen hídrico y al tiempo de descomposición de sus componentes

Humus dependiente del régimen hídrico	Humus de acuerdo al tiempo de descomposición de sus componentes
Humus bruto	O _L litter; hojarasca, residuos vegetales inalterados
Humus moder	O _F fermentación; alteración, residuos vegetales en proceso de descomposición
Humus mull	O _H humus; con acumulación de productos de resíntesis de naturaleza húmica

La totalidad de compuestos que se conceptúan bajo el término humus, abarca un conjunto heterogéneo de sustancias muy polimerizadas, de peso molecular relativamente alto, de color oscuro y de propiedades coloidales e hidrofílicas marcadas, que presentan alta capacidad de intercambio iónico y que engloban compuestos aromáticos y alifáticos en sus moléculas.





Al hablar de humificación, se habla de la transformación de sustancias orgánicas; esta transformación se acompaña de una resistencia creciente a la biodegradación por su mayor complejidad y porque la mayoría de las SH se encuentran unidas, en diversas formas, a la fracción mineral del suelo (Figura 5).

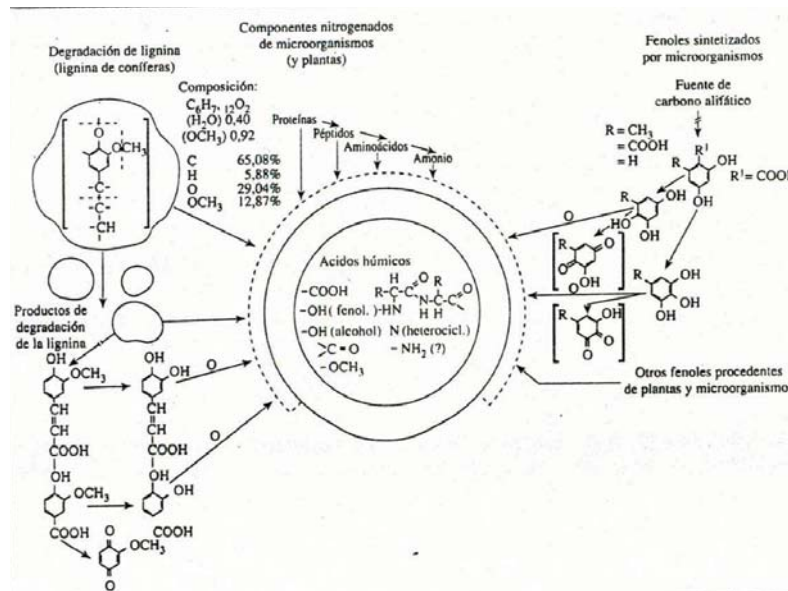


Figura 5. Esquema de la formación de sustancias húmicas

La destrucción de estas uniones, mediante una serie de técnicas analíticas, permite dividir las SH en cuatro fracciones operativas: AH, AF, ácidos himatomelánicos y huminas. Estas diferentes fracciones estarán caracterizadas por determinados grupos funcionales, ligados por distintos tipos de uniones, a unos núcleos diferentes, esto les da





unas características químicas y como consecuencia, una diferente reactividad en el suelo (Labrador, 1996).

La capacidad de la MOS para formar combinaciones estables ha sido bien estudiada, en la que numerosos compuestos están involucrados como los AH y AF. Estos pueden ser descritos como una serie de polielectrolitos altamente ácidos, de color que va del amarillo al negro y de peso molecular moderadamente elevado, cuya capacidad para combinarse con metales se debe principalmente a su densidad anormalmente elevada de grupos funcionales ácidos (Mortvedt *et al.*, 1983).

En estado natural los AH y AF están íntimamente ligados a arcillas, uno con otro y a otros compuestos orgánicos. Una gran variedad de fuerzas de enlace intermoleculares están involucradas, incluyendo puentes de H, enlaces éster, fuerzas de Van der Waals y enlaces de sal.

En el grupo de los AH están englobadas las materias que se extraen del suelo por soluciones (NaOH, KOH, NH₄OH, Na₂HCO₃, Na₄P₂O₇, NaF, oxalato sódico, urea, y otros), y que al acidificar con ácidos minerales, se precipitan de las soluciones obtenidas en forma de un gel oscuro (Kononova, 1966; citado por Mortvedt *et al.*, 1983). Esta separación es muy delicada y no puede hacerse de forma rigurosa, por muchas razones: en primer lugar, por la existencia de productos intermedios mal definidos y en segundo lugar y sobre todo por la dificultad de encontrar un reactivo de extracción capaz de aislar selectivamente y sin alterar los compuestos húmicos que existen en el suelo (Duchaufour *et al.*, 1978).

Se emplean actualmente sales alcalinas, tales como oxalato amónico (Chaminade, 1946), fluoruro sódico (Manil, 1961) o, pirofosfato de sodio (Kononova, 1961); este último reactivo parece ser el más eficaz: dispersa perfectamente el complejo húmico-arcilloso y libera los compuestos orgánicos de los compuestos insolubles





saturados de calcio, hierro o aluminio; sin embargo, todavía es fuertemente alcalino y, aunque en un grado menor, puede ofrecer el mismo inconveniente que la sosa, es decir altera la MOF y da lugar a compuestos húmicos nuevos; se evita este inconveniente empleándolo a concentración poco elevada, limitando el número de extracciones sucesivas y, finalmente, en algunos casos, añadiendo al reactivo de extracción una sal de sodio neutra (Duchaufour y Jacquín, 1963).

La adición de HCl o H₂SO₄ a la solución de extracción permite obtener dos grupos de productos fundamentales: los AF, que permanecen solubles, y los AH, que precipitan en copos. Sin embargo, es posible clasificar de manera más detallada, según su grado de solubilidad, el conjunto de los complejos que constituyen el humus (Cuadro 3). Dubach y Mehta (1963); puntualizaron que después de la extracción, es difícil liberar las SH de las impurezas inorgánicas (cationes y arcillas) y orgánicas (carbohidratos y proteínas).

Por lo tanto un ácido húmico es el material que puede extraerse del suelo por soluciones alcalinas y puede precipitarse por subsecuente acidificación, el ácido fúlvico es el material soluble en álcali que permanece en solución. Sus propiedades se describen en el siguiente cuadro:

Cuadro 3. Propiedades químicas generales de los ácidos húmicos y fúlvicos. Adaptado de un dibujo de Scheffer y Ulrich (1960); citado en Mortvedt. *et al.*, 1983).

Ácido fúlvico	Ácido húmico
---------------	--------------





(Oden)		(Berzelius)	
Ácido crénico	Ácido apocrénico	Ácidos húmicos Cafés (Springer)	Ácidos húmicos Grises (springer)
Amarillo c (Berzellius)	Amarillo-café	Café oscuro	Gris-negro

----- incremento en grado de polimerización ----- →
 2,000? ----- incremento en peso molecular ----- -300,000?
 45% ----- incremento en contenido de carbono ----- -62%
 48% ----- disminución en contenido de oxígeno ----- 30%
 1,400----- disminución en acidez intercambiable -----500

Otras de las características de los ácidos fúlvicos son: que pueden ser extraíbles con reactivos alcalinos, no precipitan después de su extracción, su peso molecular es inferior a 2000, su composición química no es específica y depende de la categoría del suelo, de la vegetación, así como el método de extracción, muestran un bajo contenido de carbono 36-44%. (Santander, 2004).

Los AF se volverían insolubles en el agua solamente por la presencia de hierro o de aluminio complejoado. Duchaufour *et al.*, (1978) separó a los AF libres más solubles, con propiedades muy ácidas (extraídos por una solución ácida), de los que están combinados con los AH que son, por tanto, mucho menos activos y se extraen mediante reactivos alcalinos, al mismo tiempo que los AF.

Para los ácidos húmicos otras de sus características es que: pueden ser extraídos con reactivos alcalinos, precipitan con ácido en forma de floculado de color pardo, su color va del pardo al negro, están formados por macromoléculas complejas de unidades





aromáticas unidas a aminoácidos, péptidos, aminoazúcares, ácidos alifáticos y otros constituyentes orgánicos, contienen de 3.5-5% de nitrógeno siendo esta la parte constitucional de la molécula; más carbono (46.62%) y menos hidrógeno (5%) y oxígeno (45-50%) que los AF, es decir, tienen un carácter más aromático y menos oxidado, contienen menos grupos carboxílicos, que los AF (Orlov, 1992).

Otras fracciones arbitrarias obtenidas con base en características de solubilidad incluyen el ácido himatomelánico, la fracción soluble en alcohol del AH, y la humina, que es la fracción insoluble en álcali. Científicos rusos hacen una clasificación del AH en dos grupos llamados Braunhuminaure (coagulado por electrolitos bajo condiciones alcalinas) y Grauhuminsäure (no coagulado por electrolitos). En la literatura alemana, revisada por Kononova (1966), se les dio considerable importancia a los llamados ácidos *crecénicos* y *apocrénicos* (descubiertos por Berzelius en 1839) que eran sustancias de un color amarillo claro del tipo del AF, aislados inicialmente del agua de manantial y posteriormente de turba y suelos minerales. Se cree que los AF tienen un peso considerablemente menor que los AH (Mortvedt *et al.*, 1983).

La mayor parte de las SH se encuentran unidas de distintas formas con la parte mineral del suelo, quedando tan sólo una pequeña fracción en estado libre, por tanto, para pasar a estado soluble es preciso destruir esta unión.

A pesar de la diversidad de los ácidos húmicos de distintos suelos, turbas, restos vegetales en descomposición, conservan unos principios de estructura muy semejantes.

La capacidad de los AH y AF de formar complejos estables con iones metálicos se debe, a su elevado contenido de grupos funcionales que presentan oxígeno, incluyendo COOH⁻ y grupos fenólicos, alcohólicos y enólicos-OH, y estructuras C=O





de varios tipos. Los grupos amino e imino también pueden estar involucrados. Tanto los grupos COOH^- y OH^- ácidos contribuyen a la naturaleza ácida de estas sustancias, siendo el COOH^- el más importante.

Otra gran diferencia entre los AH y AF es que una fracción menor de oxígeno en el ácido húmico está presente en grupos COOH^- , OH^- y $\text{C}=\text{O}$. el oxígeno no considerado en los ácidos húmicos puede existir como un componente del núcleo (enlaces éter o éster). La concentración de grupos funcionales ácidos en el ácido fúlvico podría parecer sustancialmente más elevada que en cualquier otro polímero orgánico natural.

2.2.1.1 Funciones de las sustancias húmicas: Los ácidos húmicos ejercen un papel muy importante en el transporte y asimilación de nutrientes por las plantas, pues afectan directamente las actividades enzimáticas y de permeabilidad de membrana y/o directamente mutando de estructura, aumentando la capacidad de intercambio catiónico y disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo, estimulando la acción microbiana y la capacidad de solubilizar algunos complejos (González, 2006).

Es así como podemos decir que los compuestos húmicos afectan a las propiedades físicas y a la agregación de los suelos, haciéndolos más oscuros, lo que facilita un incremento térmico en primavera; incrementan la capacidad de retención de agua a baja presión de succión, dado su comportamiento sol-gel que confiere una capacidad “esponja” a los suelos. Participan, por su capacidad quelante en la construcción de las entidades organizadas del suelo (complejos organo-metálicos, complejos argilo-húmicos) y se encuentran presentes en los agregados del suelo participando como un gel más en los procesos de adherencia o englobando componentes, junto a una amplia gama de gomas y mucílagos de origen múltiple.

Cuando se degradan liberan sus componentes asociados: macro, micro y oligo nutrientes (pero también hay que incluir aquellos con capacidad tóxica (EPTs) y otras moléculas orgánicas de muy difícil degradación, que en su momento retuvo.





Un aspecto de interés agrícola aplicado de la asociación con arcillas es que hace descender la densidad aparente del conjunto, lo que tiene repercusiones biológicas, al hacer la estructura más esponjosa y oscura con más agua y calor en primavera, lo que repercute en la germinación de las semillas, en la nascencia de la raíz primaria y en la emergencia de la plántula (la agregación textural actúa de forma contraria). La capacidad tampón de estos compuestos humificados; tienen interés en la regulación del pH en la globalidad del suelo. Durante los primeros momentos de la germinación, cuando los tegumentos externos de las semillas han perdido su capacidad para retener los iones presentes en el endospermo, las SH con su capacidad de intercambio catiónico, toman el relevo, al generar un nicho operativo, hasta que las nuevas membranas aparecen, evitando que se pierda el contenido iónico que tanto esfuerzo bioquímico y fisiológico costó para ser acumulado en las semillas.

Se ha aceptado que los ácidos húmicos son buenos para las plantas, pero su justificación es menos conocida. Se sabe de ciertas capacidades para estimular el desarrollo vertical y horizontal de las raíces y de sus tricoblastos (pelos radiculares y todos sabemos que a mayor esfera de exploración, mejor nutrición y más producción.

Estos hechos se supone que son consecuencia de los efectos auxínicos conocidos y de rastros de ácido indolacético (hormona vegetal reguladora del crecimiento). Pero el límite de aportación de ácidos húmicos (como fertilizante) es de 800 ppm, y como en todos los manejos hormonales sobre seres vivos, sobrepasarle causa efectos anómalos.

El contacto directo de los ácidos fúlvicos con las raíces genera un incremento en la permeabilidad y captura de O_2 , estimula a determinados genes, lo que condiciona un mayor crecimiento longitudinal e incrementa la resistencia de las raíces frente a agresiones biológicas externas. También induce la síntesis y actividad de enzimas que como invertasa y esterasas, están involucradas en proceso de crecimiento y organogénesis en diferentes estadios de desarrollo de la planta (González, 2006).

2.2.1.2 Formación de sustancias prehúmicas. Los oligómeros peptídicos, glucídicos o fenólicos cuando no son biodegradados en una primera fase sufren interacciones químicas y bioquímicas, que conducen a la formación de compuestos condensados pigmentados, de estructura compleja, los cuales se denominan





policondensados prehúmicos (Figura 6). Estos son precursores directos de los compuestos húmicos que pueden tener un doble origen, microbiano y vegetal.

Respecto a los precursores que contienen grupos fenólicos, mediante oxidaciones enzimáticas se transformarán en radicales semiquinónicos, que al asociarse con otros grupos reactivos darán lugar a productos cada vez más polimerizados, de tinte pardo, base para la formación de SH.

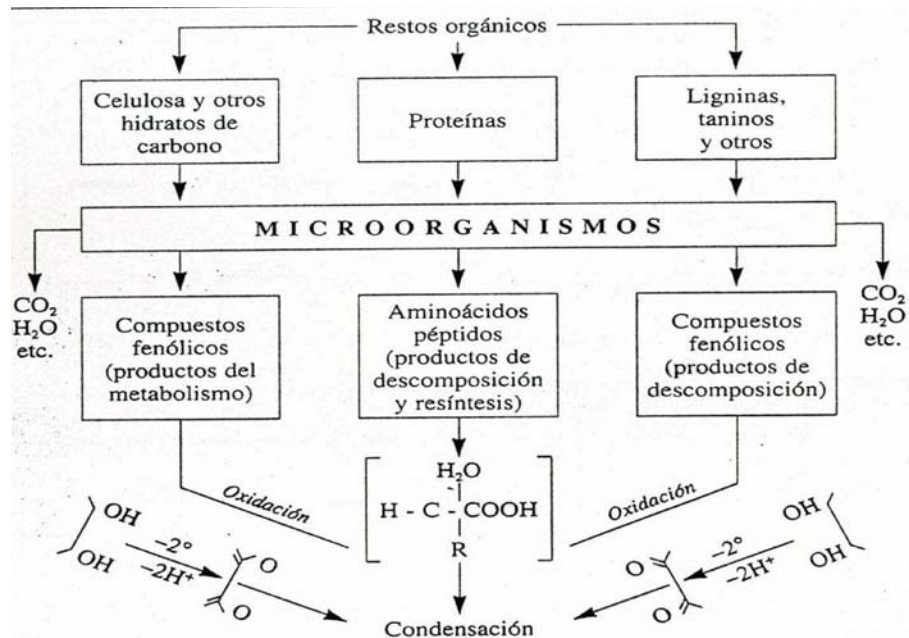


Figura 6. Transformación y evolución hasta sustancias húmicas de la fracción orgánica en el suelo

Igualmente las hojas de algunas plantas –neutrófilas- aportan con sus residuos, compuestos fenólicos pigmentados “prehúmicos” que se denominan “melaninas vegetales” y que son rápidamente metabolizadas en medios muy activos.

Tiene gran importancia la formación de compuestos prehúmicos por los microorganismos, las denominadas “melaninas microbianas” que son polímeros fenólicos de tinte pardo, de estructura mal conocida, formado en el interior de sus células y en el medio.





Como es de saber, los distintos precursores evolucionan de manera diferente a la síntesis húmica por neoformación; los azúcares y los aminoácidos procedentes de la degradación de polisacáridos y péptidos, además de compuestos orgánicos sencillos, servirán fundamentalmente de alimento y soporte energético a la biomasa microbiana que tienen una vida efímera y que suministrará al medio ciertos compuestos que participan en la formación de las moléculas húmicas como unidades estructurales, la lisis de los polifenoles y la posterior polimerización de las unidades que no son biodegradadas, darán lugar a los núcleos aromáticos de las macromoléculas húmicas alrededor de los cuáles se organizarán las cadenas alifáticas (Labrador, 1996).

2.2.1.3 Fórmula estructural de las sustancias húmicas: Se han realizado numerosos intentos por dilucidar la fórmula estructural de los ácidos húmicos y fúlvicos pero, como puntualizaron Dubach y Metha (1963) no existen dos moléculas de “humus” que presenten una estructura idéntica precisa. Para el AH (Figura 7), algunos investigadores contemporáneos están de acuerdo con la teoría del tipo de molécula consistente en micelas de naturaleza polimérica, la estructura básica es un anillo aromático del tipo di o trihidroxifenol unido por puentes -O-, -NH-, -N-, -S-, y otros grupos, conteniendo además grupos OH libres y doble enlace de quinonas. El color típico de los ácidos húmicos y su capacidad de formar complejos estables con metales, es consistente con este concepto. En el estado natural la molécula puede contener residuos de proteínas y carbohidratos unidos, los cuáles también forman complejos estables con metales.

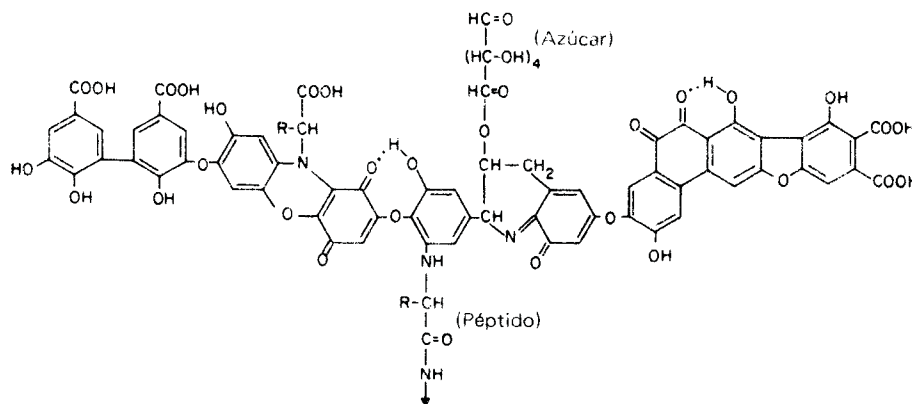




Figura 7. Estructura hipotética del ácido húmico (Bohn, 1993)

2.3 Calidad de la material orgánica

La calidad de la materia orgánica (CMO) es definida como una medida de la disponibilidad de un sustrato a los microorganismos degradadores. Es una propiedad difícil de precisar y se ha tratado de caracterizarla con base en diferentes indicadores que se describen a continuación:

a) La proporción de carbono, nitrógeno, ligninas y polifenoles, o las fracciones químicas sencillas son utilizados generalmente como índices de calidad de la MO (Amishi *et al.*, 2003), pero tales índices tienen limitaciones debido a que expresan casi la misma información; por ejemplo, la relación C:N y la concentración de N proporcionan información casi idéntica debido a la constancia en la concentración de carbono en el material vegetal. También, algunos de estos índices representan sólo una pequeña fracción del material vegetal total; por ejemplo, el N constituye menos del 2 % de la masa total de la planta. Por otra parte, las plantas no sólo contienen celulosa, lípidos, hidratos de carbono y proteínas, sino también una gama amplia de otras moléculas, entre ellos compuestos fenólicos cuya actividad biológica podría ser muy importante. Estos compuestos secundarios también regulan el proceso de descomposición. Entre otras limitaciones de usar estos índices, es que la proporción de lignina y N en los residuos orgánicos no siempre están relacionados con la mineralización de nitrógeno (Amishi *et al.*, 2003).

b) Índices de composición bioquímica basados en la transformación continua de la CMO en el tiempo (Ågren y Bosatta, 1996, 1998). Estos índices se obtienen de experimentos de descomposición en los que se hace un seguimiento de la pérdida de masa en el tiempo. Sin embargo, tales estimaciones de calidad de residuos no revelan las propiedades inherentes del material.

c) Fraccionamientos químicos, de los cuales se han propuesto una amplia gama de definiciones y esquemas de fraccionamiento. Uno de los





procedimientos utilizados actualmente es mediante extracción secuencial, en el cual se rompe la MOS en cuatro fracciones: (i) 'no polar' fracción extraída en cloruro de metileno (principalmente grasas, aceites, y ceras); (ii) 'soluble en agua' fracción extraída en agua hirviendo (principalmente hidratos de carbono solubles y fenólicos); (iii) 'soluble en ácido' fracción extraída en H_2SO_4 (principalmente celulosa y compuestos relacionados); y (iv) residuo insoluble 'ácido' (ligninas) (Gaius *et al.*, 2006).

d) Tasas de respiración de carbono (C) y de mineralización de N, como una medida de la disponibilidad de un sustrato a los microorganismos degradadores. Una actividad biológica alta en términos de la respiración de carbono (C) y de la pérdida de masa, con frecuencia está asociada con un incremento en la mineralización de N, aunque hay excepciones a esta relación (Per-Olov y Lundkvist, 2004; Leifeld y Fuhrer, 2005).

e) Mediante espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIRS), que permite caracterizar la composición bioquímica entera de la MO. La luz reflejada en el infrarrojo cercano (800-2500 nm) y visible (400-800 nm) regiones de la MO, dan información bioquímica importante sobre el carácter y el número de grupos funcionales como -CH, - Ah, y ligadura químicas -NH. Permiten explicar los espectros y calibrar las señales del NIRS, p. ej. relacionar los espectros de muestras a sus valores de referencia de laboratorio (Gillon *et al.* 1993, 1994, 1999a, b). En particular, la descomposición progresiva y continua de los espectros NIRS sobre el curso de la descomposición de residuos se ha

utilizado para predecir la pérdida de masa de residuos (Gillon *et al.* 1993, 1999b).

f) A partir del fraccionamiento físico del suelo. Estos métodos asumen que la MO puede ser dividida principalmente en dos compartimentos, que difieren en su estructura y función (Christensen, 1996). Una de estas fracciones corresponde a la fracción liviana libre (FLL) entre agregados, la fracción liviana intraagregados (FLI), que corresponde a aquella fracción protegida dentro de los microagregados, y la fracción órgano-mineral, también





denominada fracción pesada. Cada una de ellas tiene distintas funciones en el ciclo del C y N. Se postula que estas fracciones pueden ser usadas como indicadores biológicos para determinar el efecto del manejo agronómico en la CMO en los agroecosistemas (Zagal y Córdova, 2005).

Independientemente del indicador utilizados para caracterizar la calidad de la MOS, en general, la MO de alta calidad es definida como aquella que es más fácilmente procesada por los microorganismos y que tiene una más alta tasa de descomposición. El litter vegetal fresco y la MO recién formada se espera sean de mayor calidad que la MO más vieja, ya que ésta última corresponde a la MO más completamente descompuesta debido a que los componentes más disponibles ya han sido metabolizados (Aerts 1997; Berg 2000). La composición de la especie vegetal también puede tener una influencia fuerte sobre la calidad del litter y de la MOS (Gaius, *et al.*, 2006).

Sin embargo hay autores como Bosatta y Ågren (1999, citado por Sánchez, 2008), que definen la calidad de la MO como el número de pasos enzimáticos requeridos para liberar en forma de dióxido de carbono átomos de carbono a partir de compuestos orgánicos. Con esta definición el mayor número de pasos enzimáticos indica la menor calidad en los átomos de carbono.

De manera numérica calidad es el inverso del número de pasos enzimáticos requeridos para romper una molécula de un sustrato hasta CO₂; con esto el indicador calidad (q) tiene un dominio de $0 < q < 1$. Esto implica que el valor máximo de calidad es 1, debido a que no puede haber un sustrato que sea capaz de ser degradado en menos de un paso.

2.4 Función de la materia orgánica en el suelo





Además de actuar como regulador del pH, la MO al biodegradarse forma CO_2 que actúa en el intemperismo impartiendo propiedades óptimas para los suelos, como la estructura, aireación, incrementa la porosidad y retención de humedad, incrementa el poder buffer del suelo, influye en el régimen de temperatura, sirve como fuente de energía para los microorganismos, retiene las sustancias nutritivas y las intercambia, favorece la formación del suelo y el intercambio gaseoso e incrementa la CIC total del suelo. Se recomienda la rotación de cultivos y enterrar los residuos vegetales o adicionar estiércol que además de influir en las condiciones antes mencionadas favorecen la fertilidad de los suelos (Young, 1991).

Ayuda a regular los procesos químicos y de influir sobre las características físicas del suelo, según un gran número de investigadores, es el centro de casi todas las actividades biológicas del mismo (Cepeda, 1991). Se ha reconocido, dentro del concepto de CS, a la MOS como uno de los elementos que mejora más claramente la productividad y la calidad ambiental (Franzluebbers, 2002). En los procesos de formación del suelo, la importancia de la MOS reside en sus propiedades de peptización, coagulación, formación de quelatos y otros. También funciona como una fuente de energía, gracias a sus componentes de carbono (Fassbender y Bornemisza, 1987).

2.5 Influencia de la rotación de cultivos e incorporación de residuos en el contenido de materia orgánica

Los cambios en el uso o manejo del suelo influyen en su contenido de MO de dos formas: alterando el aporte anual que procede de la muerte de plantas y animales, y variando el ritmo con que se destruye esta MO (Zecaida, 2006).

Un factor importante que contribuye a incrementar la MOF son las entradas de grandes cantidades de residuos de las gramíneas incluyendo raíces, pajas, restos vegetales y el estiércol en caso de pastoreo (Wild, *et al.*, 1992). Las gramíneas,





particularmente los pastos tienen grandes masas radicales comparadas con los cereales (Francis *et al.*, 1999; Williams *et al.*, 2000) y hay evidencia que las raíces pueden ser más importantes en contribuir al almacén de carbono en el suelo que los aportes provenientes de los residuos de la parte aérea (Balesdent y Balabane, 1996). La suma de restos vegetales que producen las leguminosas perennes forrajeras también es alta y aún cuando no se incorpore el 100%, la cantidad de residuos incorporada es superior a la de cultivos anuales y hortícolas.

Wild *et al.* (1992) indican que las rotaciones de cultivo que devuelven más MO al suelo tienden hacia un nivel de equilibrio superior al que se obtiene con rotaciones que generan menos residuos. No es sorprendente que el descenso más rápido de MO se presente después de un barbecho con poca vegetación natural en el que la restitución de material vegetal es prácticamente nula.

Los cereales sobre todo el trigo y el maíz constituyen una fuente importante de humus. Una buena cosecha de trigo, cuyas pajas se entierran en la cantidad adecuada de nitrógeno, deja suficiente humus ($1000 - 1200 \text{ kg ha}^{-1}$) para compensar las pérdidas anuales (Labrador, 1996). Con el objetivo de observar los efectos de las prácticas de manejo de paja, y la rotación gramínea – leguminosa sobre la materia orgánica fresca, Curtin y Fraser (2003) evaluaron el aporte de residuos por trigo, cebada y avena con índices de cosecha 0.5, 0.45 y 0.4 respectivamente con los cuales se podrían alcanzar rendimientos de 6, 6.5 y 7 t ha^{-1} . En cuatro años de estudio en campo se observó un retorno al suelo de 25 t ha^{-1} , asumiendo un contenido de 45 % de carbono en las pajas, se determinó una incorporación de carbono total al suelo de 11.2 t ha^{-1} , del cual se estimó que 1.1 t C ha^{-1} fue retenido en el suelo.

El tipo de residuos también influye en el incremento de la MOF, debido a que varía el ritmo de mineralización de esta MO. Curtin y Fraser (2003) ejemplificaron que en cuatro años en los cuales se hicieron pruebas sobre la descomposición de pajas de trigo, cebada y avena, encontraron que ésta fue más rápida en los primeros dos meses de incorporada, la cual ya había perdido entre 31 y 39% de masa original, mostrando una descomposición más lenta posteriormente; de la masa restante en los próximos 10 meses se perdió únicamente el 21-39%, mencionan que pudo deberse a las condiciones





prevalcientes en el suelo y que es esencial conocer las tasas de descomposición de las pajas para evaluar el efecto de su incorporación sobre el carbono del suelo. Entre los factores responsables de hacer variar el ritmo con que se mineraliza dicha MOF está el contenido de N, relación C:N y lignina:N de los residuos (Espinoza, 2004).

Las pajas de los cereales y otros residuos vegetales pobre en nitrógeno llegan a una C:N superior a 50, es decir que por cada gramo de nitrógeno tienen 50g de carbono; en cambio, las leguminosas llegan a un C:N promedio de 18, pues contienen una mayor cantidad de proteínas en sus tejidos, siendo éstas las macromoléculas orgánicas que tienen nitrógeno en su estructura química (Rodríguez, 1999). El Cuadro 4 muestra la relación C:N de diversos materiales orgánicos.

Cuadro 4. Relación C/N de diversas materias orgánicas (Adaptado de Mustín (1987) citado en Labrador 1996)

Materias orgánicas	Relación C:N
Restos de serrerías.....	150 - 200
Papel.....	150 - 200
Paja: Caña de maíz.....	150
Trigo/cebada.....	100
Avena/centeno.....	60
Hojas: Aliso.....	20 - 30
Abedul, roble, sauce.....	40 - 60
Turvas.....	30 - 100





Abonos verdes y césped.....	10 -20
Matas de leguminosas.....	10 -15
Residuos de cultivo del champiñón.....	30 -40
Residuos orgánicos de:	
Bovino: Purin.....	2 - 3
Lisin.....	5 - 8
Estiércol con paja.....	15 - 30
Porcino: Lisier.....	4 - 7
Caballo: Estiércol.....	20 - 60
Ovino: Estiércol.....	15 - 20
Aves: Estiércol.....	10 - 15
Materias fecales humanas.....	5 - 20
Harina de sangre.....	3

En suelos cultivados la relación C:N es característica de la microflora y en general varía entre 8 y 10 en los suelos biológicamente activos. Si se incorporan restos con relación C:N muy alta (>30), por ejemplo paja, los microorganismos liberan en exceso el carbono en forma de CO₂ y fijan el nitrógeno mineral en forma orgánica, contribuyendo a una humificación más activa. Inversamente si se introducen el suelo residuos con C:N bajo, sangre desecada por ejemplo, se produce una mineralización rápida del nitrógeno en exceso, en forma amoniacal y nítrica, pero la humificación queda muy reducida. En ambos casos los compuestos húmicos formados tienen la relación de equilibrio, 10 por ejemplo, característica del suelo (Duchaufour *et al.*, 1975).





2.6 Otros factores que influyen en el contenido de materia orgánica

Tanto la humificación con la mineralización de los restos orgánicos dependen de la naturaleza de éstos como de las características del medio, de manera que los factores externos como el clima, el suelo, la acción humana, etc., e internos como la composición del material orgánico, dirigen y definen ambos procesos.

2.6.1 Organismos. Su función es primordial en los procesos de humificación y mineralización de la MO. Éstos se encargan de descomponer y transformar a compuestos más simples y de mineralizar, los constituyentes de los restos orgánicos, además de resintetizar sustancias a través de su metabolismo que participarán como unidades estructurales en la formación de macromoléculas húmicas; al tiempo que las fenoloxidasas, procedentes de hongos, actinomicetes y otras bacterias catalizan las reacciones de polimerización de compuestos fenólicos -paso previo a la formación de SH- y contribuyen a la formación de las cadenas alifáticas de los AH Y AF (Labrador, 1996).

2.6.2 Clima. Interviene de forma determinante sobre la vegetación y todo lo relacionado con el desarrollo de la misma; así como en su distribución, material producido por las plantas y la intensidad de la actividad microbiana (Cepeda, 1991); las secuencias climáticas dan lugar a valores determinados de pluviosidad y temperatura, las cuales marcan el ritmo de vegetación climática asociada, esta relación tiene

respuesta directa y determinante en la edafogénesis y fundamentalmente sobre los procesos relacionados con la transformación de la MO. Consecuentemente las secuencias estación-vegetación aparecen estrechamente ligada a los procesos de formación de los distintos tipos de humus (Labrador, 1996).

2.6.3 Geomorfología. Ejerce gran influencia en la cantidad de MO en dos formas. La pendiente hacia el norte (en el hemisferio septentrional), son más frías y más húmedas, razón por la que el contenido de MO es mayor que en los suelos cuya pendiente es hacia el sur. Es muy evidente el efecto que tiene la topografía en el drenaje del suelo, por ejemplo en los suelos pantanosos en donde no hay suficiente suministro de oxígeno por lo tanto las plantas mueren; en aguas estancadas, donde el oxígeno se





suministra por difusión a los organismos los cuales llevan a cabo la descomposición (Bohn 1993).

2.6.4 Humedad. Al igual que el clima el contenido de humedad afecta al desarrollo de la vegetación de manera directa, y no sólo a la vegetación sino también a la vida microbiana la cuál exige la presencia de agua proveniente de los residuos o del propio suelo para su multiplicación. El contenido de agua más favorable para el correcto funcionamiento de la dinámica de la transformación de los restos orgánicos, podemos situarlo en un 60% de la humedad equivalente (Labrador, 1996).

2.6.5 Temperatura. Factor prioritario en la transformación de la MO, la cual interviene en la relación entre el aporte de material vegetal bruto y la velocidad de transformación, predominando según los valores de temperatura existentes (Labrador, 1996).

2.6.6 Nutrientes. Las necesidades de macro y micronutrientes es la misma para los microorganismos que para los vegetales superiores, aunque si tuviéramos que rescatar alguno de ellos en la evolución de los procesos de humificación sería el nitrógeno, ya que es frecuente encontrar clasificados los materiales orgánicos según su contenido en nitrógeno (Labrador, 1996).

2.6.7 Excretas de ganado. La incorporación de estiércoles al suelo, es otra práctica agronómica que también puede incrementar el contenido de MO.

El estiércol como tal, básicamente está formado por materiales hidrocarbonados, compuestos nitrogenados y una gran población microbiana. En la composición mineral del estiércol sólido cabe destacar una notable heterogeneidad (Cuadro 5). Se trata de un abono compuesto de naturaleza organo- mineral, rico en MO, con un contenido en elementos minerales bajo. Su nitrógeno se encuentra casi exclusivamente en forma orgánica y requiere la mineralización previa para ser asimilado por los cultivos, se caracterizan en general por un contenido reducido de nitrógeno amoniacal, fósforo y potasio que se encuentran aproximadamente al 50% en forma orgánica y mineral.





Contiene además una gran cantidad de oligoelementos y sus rancias fisiológicamente activas como hormonas, vitaminas y antibióticos.

Cuadro 5. Composición media de diferentes estiércoles generados en Cataluña

Composición	Gallinasa	Oveja	Ternero	Vaca	Conejo
Materia seca (%)	22 o 76 (2)	25	23	23	26
pH	6.80	7.82	7.90	8.17	7.47
Conductividad	5.78	2.81	4.72	4.03	2.87
Materia orgánica (%) (1)	64.71	64.08	73.25	66.28	69.38
Nitrógeno (%)	1.74	2.54	2.40	1.84	2.79
P ₂ O ₅ (%)	4.18	1.19	1.50	1.73	4.86
K ₂ O (%)	3.79	2.83	3.14	3.10	1.88
Relación C:N	20.15	10.57	14.55	13.90	10.92





CaO (%)	8.90	7.76	2.99	3.74	6.62
MgO (%)	2.90	1.51	0.91	1.08	2.10
Na ₂ O (%)	0.59	0.62	0.78	0.58	0.35
Fe (%)	0.49	0.34	0.23	0.41	0.24
Mn (mg/Kg)	506	306	160	172	258
Contenido en elementos potencialmente tóxicos (mg/kg)					
Cinz	452	120	177	133	417
Cobre	177	27	26	33	42
Niquel	27	15	8	20	16
Plomo	19	10	9	14	18
Cromo	63	16	8	24	32
Cadmio	1	1	1	1	1

- (1) Todos los resultados se están expresados sobre materia seca
 (2) Ponedoras en batería y pollos de engorde respectivamente
 Cerra (1988) Vazques y Orimí (1989) citados en Labrador 1996

El estiércol producido por una cabeza de ganado vacuno adulto en estabulación es del orden de 10 a 12 t/año, siendo de 5 a 6 t solamente, si pasa seis meses en el prado.

Cuando las praderas son pastoreadas se transfirieron grandes cantidades de MO y nitrógeno al suelo mediante las excretas. Si los animales consumen 10 000 kg MS ha⁻¹ año⁻¹, con la digestibilidad de 65%, la cantidad de MO que retorna en el estiércol es de 3500 kg ha⁻¹. Si la cantidad total del nitrógeno consumido es de 250 kg ha⁻¹ y es excretado un 80% entonces el retorno mediante el estiércol y la orina, es de 200 kg N ha⁻¹ (Whitehead, 1995).

Whitehead (1995) indica que asumiendo para ganado lechero, en pastoreo intensivo una cantidad de 700 días-vaca ha⁻¹ año⁻¹ con una frecuencia de orinas de 10 veces por día con el 85% depositado en la pradera, un volumen promedio de 3 L por orina y una concentración de 9 g N L⁻¹, entonces el nitrógeno que retorna en la orina





sumaría la cantidad de 160 kg N ha^{-1} que con ganado lechero pastando en praderas con alto rendimiento de follaje, conteniendo más del 3% de N, la cantidad de nitrógeno que retorna en la orina puede ser tan alta como $240 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y si cada deposición de estiércol con una cantidad de 0.3 kg de materia seca cubre un área de 0.07 m^2 con una concentración de nitrógeno de 2.8%, entonces el retorno de N sobre el área cubierta sería de 1200 kg ha^{-1} .

A diferencia del nitrógeno presente en la orina, que es fácilmente mineralizado a formas disponibles para las plantas, la mayor parte del nitrógeno en las heces está en formas orgánicas que son relativamente resistentes a la descomposición, y a menudo sólo un 25% aproximadamente es mineralizado en el primer año después de la deposición. La tasa a la cual las heces son incorporadas al suelo, depende generalmente del grado de desintegración física y de las condiciones de humedad (Whitehead, 1995).

Cuadro 6. Valores promedio de N excretado a través de la orina de las vacas

VACAS LECHERAS	
Orinas por día	8-12
Volumen por orina (L)	1.5-3.5
Volumen de orina por día (L)	10-40
Materia seca en la orina (g L-1)	60-120
Concentración de nitrógeno (g L-1)	2-20
N excretado en la orina (g N d-1)	80-320
N excretado en la orina (g N año-1)	30-120





Las entradas al sistema por medio de las excretas puede apreciarse en el cuadro anterior (Cuadro 6) en el que se revelan grandes cantidades considerables de nitrógeno aportado por el ganado lechero, ya que según Whitehead (1995) el ganado en lactancia o en producción de carne excreta grandes cantidades de nitrógeno en comparación con el ganado que no se encuentra bajo alguna de las dos situaciones, tales cantidades indican que efectivamente el hecho de que las praderas sean pastoreadas, es una ventaja por los aportes de materia seca y nitrógeno que entran inmediatamente a formar parte de la dinámica del N y en consecuencia de la MOS.

2.6.8 Minerales del suelo. La composición granulométrica influye en el proceso de mineralización, se sabe que para un suelo dado y un clima dado, hay un contenido máximo de humus. Así encontramos que en la acumulación de humus influye más la capacidad de absorción de las arcillas que los contenidos totales de las mismas o que los suelos ligeros, presentan una descomposición más rápida de los restos orgánicos y una movilidad mayor de los nutrientes producidos a lo largo del perfil (Labrador, 1996). Wild (1992) menciona que las arcillas pueden proteger la MO de diferentes formas: haciéndola menos accesible a la población del suelo; estabilizando los nuevos metabolitos formados; y, aumentando la longevidad de los organismos edáficos. Además indica que algunas de las investigaciones han demostrado que casi todo el humus del suelo puede estar estrechamente ligado a partículas de arcilla.

2.6.9 Material parental. Determina el contenido de MO principalmente a través de su efecto en la textura del suelo. En una zona de clima y topografía similares el contenido de MO tiende a incrementarse con el contenido de arcilla. La asociación íntima de sustancias húmicas con los sólidos inorgánicos en forma de complejos organominerales conserva la MO. Esta fuerte interacción entre las arcillas y la MO también hacen resaltar los efectos de la MO en las propiedades físicas y químicas del suelo (Bohn, 1993).

2.6.10 pH del suelo. Ejerce sobre la humificación una acción directa – cantidad y calidad del humus – afectando además, a la naturaleza de la población vegetal que





sustenta el suelo y por lo tanto a la composición del material orgánico que va a ser luego transformado (Labrador, 1996).

2.6.11 Presencia de sustancias inhibidoras. La riqueza química de los exudados radicales de ciertos vegetales actúa sobre determinados grupos de microorganismos –favoreciendo o inhibiendo su acción – sobre la transformación de los restos orgánicos que de ellos depende (Labrador, 1996).

2.7 La espectroscopia ultravioleta, visible y de infrarrojo para la caracterización de la materia orgánica

Una vez que se ha separado la MO no humificada y las sustancias húmicas, es posible caracterizar los AH, AF y las huminas.

Las técnicas de Espectroscopia Ultravioleta, Visible y Espectroscopia de Infrarrojo son consideradas técnicas no destructivas para el estudio de la materia orgánica y dado que serán las técnicas utilizadas en el presente trabajo de investigación para definir el grado de condensación aromática y los grupos funcionales que componen las sustancias húmicas extraídas, se describen a continuación:

2.7.1 Espectroscopia Ultravioleta y Visible . La relación de absorbancias 465 y 665 nm, referidas como E_4/E_6 ha sido ampliamente utilizada con propósitos de caracterización. La relación de los AH generalmente es menor de 5.0; para los AF, el intervalo es de 6.0 a 8.5. De acuerdo a Chen *et al.* (1977), el mejor procedimiento para determinar la relación E_4/E_6 es disolver de 2 a 4 mg de ácido húmicos o fúlvicos en 10 mL de NaHCO_3 0.05N, el cual da un pH óptimo para la medición de la absorbancia.

El cociente de la relación es independiente de las concentraciones de los materiales húmicos, pero disminuye con un incremento en el peso molecular y condensación (alto contenido de carbono y bajo contenido de oxígeno, característico de





los ácidos húmicos); se utiliza como un índice de humificación. Por tanto, una relación baja puede indicar un relativamente alto grado de condensación de constituyentes aromáticos; de una alta relación se infiere la presencia de relativamente más estructuras alifáticas. Se ha observado una relación inversa entre la relación E_4/E_6 y el promedio del tiempo de permanencia del material húmico; específicamente, las sustancias húmicas con las más altas relaciones presentaban los menores tiempos de permanencia (Stevenson, 1994).

2.7.2 Espectroscopia de Infrarrojo (IR). El análisis espectroscópico es considerado como una de las mejores técnicas de análisis instrumental para la adquisición de información tanto cualitativa como cuantitativa; su principal aplicación ha sido la identificación de grupos funcionales en compuestos orgánicos. Su elevada selectividad a menudo hace posible la cuantificación de una sustancia en una mezcla compleja, no siendo necesario una separación previa (Skoog y Leary 1994; citado por Santander 2004).

Las técnicas espectroscópicas se clasifican según la región del espectro electromagnético (Figura 8) que se encuentre involucrado y se basa en la medida de la radiación electromagnética emitida o absorbida por la materia. La radiación electromagnética o espectro electromagnético es un conjunto de ondas que se transmiten a través del espacio, las cuáles están perfectamente caracterizadas por su longitud de onda y su energía.- está constituido desde los rayos gama, seguido de los rayos X, que son considerados de longitud de onda pequeña y de alta energía, hasta las ondas de radio que es una región que se caracteriza por una longitud de onda grande y baja energía.



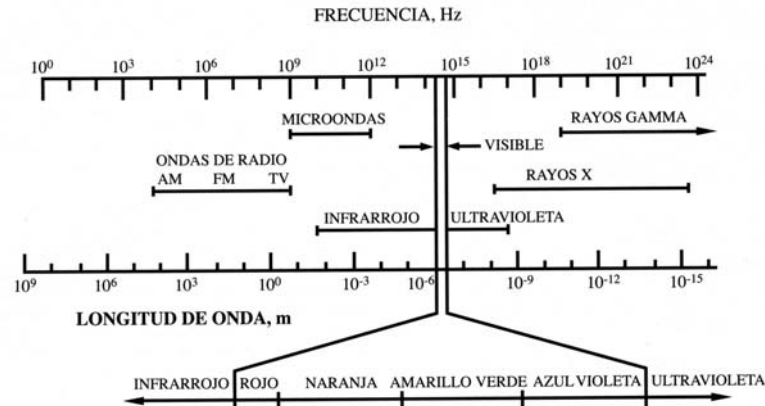


Figura 8. Espectro electromagnético

Los análisis en el infrarrojo de los átomos de cualquier molécula con enlaces covalentes presentan movimientos de vibración, cuya energía necesaria para efectuarlos es del orden de la energía de la radiación infrarroja.

La absorción en el infrarrojo se origina cuando la frecuencia de la radiación que interactúa con una molécula, es de la misma magnitud que la frecuencia de vibración de un enlace en la molécula.

La espectroscopia de IR es usada para la caracterización de los materiales húmicos de diferentes orígenes, para la evaluación de los efectos de diferentes extractantes químicos, modificaciones químicas como mutilación, acetilación, saponificación, para la formación de derivados. Esto también puede ser usado para detectar cambios de estructura química de materiales húmicos, seguir una oxidación, y tratamiento similares a la pirólisis. El espectro de IR refleja el predominio del contenido de oxígeno en grupos funcionales como, ácidos carboxílicos (R-COOH), hidroxilo (R-





OH, Ar-OH) y carbonilo ($R_2-C=O$) en materiales húmicos (Schnitzer, 1978; citado por Santander, 2004)

Los grupos funcionales más comunes identificados en el IR son: acetilenos ($RC\equiv CH$ y $RC\equiv CR$), anhídrido de ácido, haluro de acilo, ácido carboxílico, alcoholes, aldehídos, amidas, aminas, ésteres, éteres, hidrocarburos saturados, hidrocarburos aromáticos, cetonas, nitrilos ($C\equiv N$), compuestos nitrados, olefinas, iminas, misceláneas (que contienen grupos con azufre, fósforo, silicio, fluor, cloro y bromo) y sales inorgánicas y compuestos derivados (Shriner *et al.*, 1991; citado por Santander, 2004).

La intensidad relativa de la señal de absorción en el Infrarrojo con Transformadas de Fourier, ha sido usada para evaluar la degradación y humificación de la turba (Lehtovvar *et al* 1988; citado en Santander, 2004); y la descomposición aeróbica de la MO (Invar. *et al.*, 1989; citados por Niemeyer *et al.* 1992).





3. JUSTIFICACIÓN

Por ser el suelo uno de los componentes principales de los sistemas de producción agrícola y ganadero, el conocimiento y la valoración de sus propiedades, es una condición necesaria para evaluar la sustentabilidad del mismo. Este trabajo está dirigido a evaluar el impacto del sistema de producción de forrajes en condiciones de pastoreo para la producción de leche de la Universidad Autónoma Chapingo a través de la cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo como indicadores de calidad, mismos que serán base en la toma de decisiones para seleccionar el sistema de rotación más apropiado.





OBJETIVOS

Objetivo general: Evaluar el efecto de los residuos derivados de diferentes rotaciones de cultivos forrajeros en la cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo.

Objetivos particulares:

- Determinar la cantidad y calidad de los residuos de cosecha que se incorporan al suelo en cada rotación con base en el contenido de nitrógeno y en la relación Carbono-Nitrógeno.
- Determinar la calidad de la materia orgánica del suelo derivada de la descomposición de los residuos de cosecha al término de la rotación, con base en su grado de condensación y mediante la determinación de grupos funcionales de las sustancias húmicas y fúlvicas.





3. HIPOTESIS

Para responder al objetivo específico dos, se plantearon las siguientes hipótesis:

1. Dada la diversidad de residuos procedentes de las rotaciones, el efecto en el contenido de la materia orgánica del suelo es función de la cantidad de residuos incorporados, del contenido de nitrógeno y de la relación carbono nitrógeno presente en éstos.

2. El tipo de residuos procedentes de las rotaciones influye en la formación de los ácidos húmicos y fúlvicos, en su grado de condensación y en la presencia de grupos funcionales. Esta calidad de la materia orgánica es menos alterada en la profundidad 30 a 60 cm.





4. MÉTODO

4.1 Descripción de la zona

El experimento se llevó a cabo en el “Módulo de Producción de Leche en Pastoreo” ubicado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, situado a 19° 31' latitud N y 98° 58' longitud W y 2 249 m de altitud.

De acuerdo con García (1987), la fórmula climática del lugar es Cb(wo)(w)b(i')g, la cual se refiere a un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, precipitación del mes más seco menor a 40 mm y con menos del 5% de la lluvia total en el periodo invernal; con una precipitación media anual de 645 mm, con temperatura media anual de 15° C, siendo mayo el mes de mayor temperatura con una media de 17.7° C y enero el mes más frío con 11.8° C; la oscilación térmica es escasa.

El suelo del sitio experimental se ha clasificado como Argiustoll Vértico profundo y negro (Cachón *et al.*, 1976); las características del horizonte superficial (0 - 20cm) son las siguientes: textura migajón arcilloso, capacidad de campo 30%, punto de marchitez permanente 15%, pH 6.8 y 2.3% de materia orgánica.

4.2 Diseño de tratamientos y experimental

El experimento se inició en abril de 2005 el cual sostenía pradera de alfalfa (*Medicago sativa*, cv. Jupiter) en asociación con ovinillo (*Dactylis glomerata* cv. Potomac) de dos años y medio de establecida. La pradera se dividió en tres bloques, dentro de los cuales se asignaron tres tratamientos de uso del suelo: a) Pradera de alfalfa+ovillo de dos años y medio, un ciclo de maíz y un ciclo de avena+raigrás anual (P-M-A); b) pradera de alfalfa+ovillo de tres años y un ciclo de avena+raigrás anual (P-A) y c) pradera de alfalfa+ovillo (P). Las parcelas correspondientes a las praderas de alfalfa+ovillo y avena+raigrás fueron sometidas a pastoreo rotacional con vacas Holstein. Los detalles del experimento se detallan en Zecaida (2006).





Los restos vegetales que quedaron después de los pastoreos en las parcelas con uso de suelo pradera de alfalfa+ovillo, pradera de avena+raigrás anual, por medio del laboreo se incorporaron al suelo al final del ciclo del cultivo, en la etapa correspondiente según la secuencia de la rotación. Para el caso del cultivo de maíz los restos después del corte de la parte aérea de la misma manera se incorporaron al suelo. En el caso donde el terreno se mantuvo ocupado por pradera alfalfa+ovillo durante el periodo experimental (tratamiento P-P-P) el suelo sólo recibió los aportes del follaje muerto durante su periodo de subsistencia correspondiente a tres años y medio y al final del experimento (Abril de 2006) a dicho aporte se le sumó la totalidad de residuos vegetales que restaron después del pastoreo, incluyendo follaje y raíces.

Con el propósito de determinar el comportamiento de nitrógeno total, nitrógeno inorgánico y materia orgánica en el suelo bajo los tres usos se llevaron a cabo tres momentos de muestreo. En las fechas que se muestran en la Figura 1.

El primero se realizó en abril de 2005 previo a la preparación del terreno para la siembra de maíz (Figura 9), el segundo a finales de octubre de 2005 una vez concluido el ciclo vegetativo del maíz y antes de la roturación para la siembra de avena+raigrás, el tercero en abril de 2006 al término del ciclo vegetativo de avena+raigrás. En cada muestreo, se tomaron dos muestras compuestas (de 36 submuestras) por cada unidad experimental, una a la profundidad 0 a 30 y otra de 30 a 60 cm. También, al inicio del experimento se realizó un muestreo del área total con la finalidad de caracterizar el suelo.

Las muestras una vez secas al aire, fueron molidas y tamizadas por malla 80 para el análisis de nitrógeno total Kjeldhal (Bremner y Mulvaney, 1982) y materia orgánica por el procedimiento de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982).

Para la caracterización de la materia orgánica de acuerdo al grado de condensación de los ácidos húmicos y fúlvicos, primero se procedió a la extracción de estos componentes mediante una solución 1:1 de Pirofosfato de sodio ($\text{Na}_4\text{O}_7\text{P}_2$) 0.1 M e Hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M, siguiendo el procedimiento de Celli *et al.*, 1997 citado por Santander, 2004





Para la determinación de la relación E4/E6 descrita por Stevenson (1994), dos miligramos de ácidos húmicos y cuatro miligramos de ácidos fúlvicos fueron disueltos en 10 mL de NaHCO_3 0.05 M, a cada muestra entonces se midieron las absorbancias de las soluciones a una longitud de onda de 465 nm (E4) y 665 nm (E6) en un espectrofotómetro de UV/Vis (Dos Santos, 2003).

La determinación de los grupos funcionales presentes en las fracciones húmicas y fúlvicas se realizó por Espectroscopia en el infrarrojo con transformadas de Fourier en pastilla de bromuro de potasio (FT-IR, KBr) por espectroscopia IR (Stevenson, 1994).

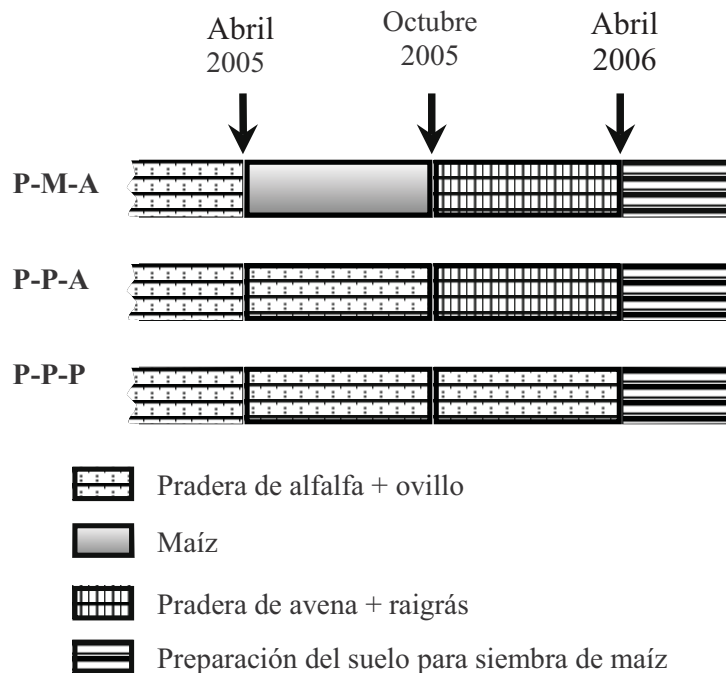


Figura 9. Esquema de la combinación de los tratamientos y usos del suelo.





Para el análisis de la información se empleó el siguiente modelo estadístico correspondiente a un diseño en bloques al azar con mediciones repetidas en el tiempo (parcelas divididas en el tiempo):

$$y_{ijk} = \mu + U_i + B_j + U \times B_{ij} + M_k + U \times M_{ik} + E_{ijk}$$

U_i = efecto del i -ésimo uso y manejo del suelo ($i = P-M-A, P-A, P$)

B_j = efecto del j -ésimo bloque ($j = 1, 2, 3$)

$U \times B_{ij}$ = efecto de la interacción entre el i -ésimo uso del suelo y el j -ésimo bloque, término de error para el efecto de uso del suelo.

M_k = efecto del k -ésimo momento de muestreo ($k = 1, 2, 3$)

$U \times M_{ik}$ = efecto de la interacción entre el i -ésimo uso del suelo y el k -ésimo momento de muestreo

E_{ijk} = error experimental

Para las pruebas de comparación de medias se empleó el procedimiento de Tukey, con una probabilidad de 5%. El análisis de la información se realizó con ayuda del programa Statistical Analysis System (SAS, 1999).





5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Características químicas del suelo

En el Cuadro 7 se presentan las características químicas del suelo previo al inicio de las rotaciones de los cultivos, cuando la pradera de alfalfa+ovillo contaba con dos años y medio de establecida.

Cuadro 7. Principales características químicas del suelo (Zecaida, 2006)

Profundidad	pH	CE	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Zn ²⁺	Mn ²⁺	Fe ³⁺	Cu ²⁺
cm	¹ Agua Rel. 1:2	¹ Rel. 1:5	¹ CH ₃ COONH ₄ 1N pH 7			¹ DTPA			
		μS	cmol kg ⁻¹			mg kg ⁻¹			
0 – 30	6.9	253	1.46	5.34	9.79	1.36	73.2	19.0	1.4
30 – 60	7.1	241	0.68	1.78	9.87	0.94	62.4	15.8	1.0

¹Método de extracción

Con base en los datos presentados en el cuadro 7, el pH del suelo en ambas profundidades se clasifica como neutro por lo que no representa un factor limitante en cuanto a la disponibilidad de nutrientes para el desarrollo de la pradera (Castellanos, 2000). El K, Mg y Ca presentaron un nivel alto a la profundidad 0 a 30 cm y medio de 30 a 60 cm. De los micronutrientes, el Zn estuvo en un nivel adecuado a la profundidad 0 a 30 cm y marginal en la segunda capa, Mn y Fe presentaron un nivel alto en ambas profundidades, en tanto que el de Cu fue marginal en toda la profundidad evaluada.





La textura del suelo estudiado correspondió a franco arcillo arenoso (Cuadro 8), propiedad que le confiere a los suelos una capacidad relativamente alta para retener agua y nutrimentos, y adecuada para aireación y drenaje; la densidad aparente de 1.3 y 1.2 g cm⁻³ a la profundidad 0–30 cm y 30–60 cm respectivamente, reflejan problemas de compactación del suelo (Castellanos, 2000), mismo que se observó en campo, ya que el mayor desarrolló radical se presentó en los primeros 20 cm.

Cuadro 8. Principales características físicas del suelo (Zecaida, 2006)

Profundidad cm	Arena	Limo	Arcilla	Clase	Densidad Aparente g cm ⁻³	Constantes de humedad	
						CC	PMP
		%				%	
0 – 30	43.8	28.4	27.8	Franco arcillo arenoso	1.3	30	15
30 – 60	42.2	28.0	29.8	Franco arcillo arenoso	1.2	29	14

5.2 Condiciones de clima y suelo

Los meses más cálidos correspondieron de febrero a octubre tanto del 2005 como del 2006, en donde la temperatura fluctuó de 20.1 a 24.9° C y los meses más fríos de noviembre a enero, con oscilaciones entre 18.1 a 19.9° C. De acuerdo al balance de humedad en el suelo, los mayores contenidos se presentaron en los meses de mayo a noviembre de 2005 con fluctuaciones de humedad de 30.8 a 186.8% de la capacidad de retención del suelo y los más secos de diciembre a abril de 2005 y de 2006. Los detalles de precipitación, temperatura y humedad del suelo están referidos en Zecaida (2006).

Es conocido que cuando el contenido de humedad en el suelo es adecuado para los microorganismos, la mineralización se incrementa con aumentos de temperatura, dentro de un intervalo de 5 hasta los 30° C; y, cuando la temperatura oscila entre los ±5° C, la mineralización se incrementa con un estado de humedad en el suelo entre el punto de marchites permanente y capacidad de campo (Whitehead, 1995).





Un estudio realizado por Chantigny *et al.* (2001) en el que evaluaron las transformaciones de carbono en suelos tratados con diferentes materiales orgánicos (residuos de maíz, de alfalfa, estiércol de vaca y cerdo) en ambientes húmedos y fríos, concluyeron que las enmiendas orgánicas al suelo contribuyeron en el incremento de la actividad microbiana en suelos con estas condiciones climáticas, indicando que las transformaciones de C y N se puede presentar incluso a temperaturas cercanas a 0° C. Algunos investigadores han establecido que el contenido óptimo de humedad para la mineralización es 75% de la capacidad de campo (González *et al.*, 1995). Contenidos de humedad superiores a la capacidad de campo originan una disminución en la tasa de mineralización porque en el suelo se propician condiciones de anaerobiosis y el crecimiento de microorganismos en estas condiciones que son los más eficientes en llevar a cabo este proceso, se restringe (Whitehead, 1995). Durante el desarrollo del experimento, sólo en los meses Julio y Agosto del 2005 se presentaron condiciones de humedad por encima de la capacidad de retención del suelo (30 %). En los meses donde hubo escasez de humedad o condiciones con menos del 30% de humedad de la capacidad de campo no puede asegurarse un efecto negativo en el proceso de mineralización de los residuos orgánicos, puesto que hay estudios que revelan que la mineralización puede ser significativa en el punto de marchites permanente como lo muestra el estudio realizado por De Neve y Hofman (2002), en un suelo enriquecido con residuos de follaje de zanahoria, en el que se evaluaron seis condiciones de humedad en el intervalo de 6 a 20% de agua en el suelo, encontraron que si bien la mineralización de N fue afectada fuertemente por la humedad del suelo, las tasas de mineralización fueron importantes a 6% de contenido de agua (correspondiendo al punto de marchites permanente). Con base en esta información, durante la fase experimental de esta investigación, hubo condiciones de temperatura y humedad favorables para la descomposición de los residuos de los cultivos en rotación.





5.3 Cantidad y calidad de los residuos orgánicos incorporados

La cantidad de materia seca derivada de la parte aérea y radical se muestra en el Cuadro 9, donde se compara la cantidad total de residuos incorporados al término de la rotación, la concentración de nitrógeno en los residuos, la relación C:N y el N total incorporado al suelo.

Cuadro 9. Residuos orgánicos incorporados al suelo al término de la rotación y características químicas de los residuos (Zecaida, 2006)

¹ Uso del suelo	² Total de Residuos incorporados al término de la rotación kg MS ha ⁻¹	⁴ Concentración de N en los residuos de cada cultivo %	³ Relación C:N	⁵ N total incorporado kg ha ⁻¹
P-P-P	13 300	2.2	20	293
P-M-A	22 200	1.9	70	438
P-P-A	17 700	1.3	26	354

^{1, 2}P-P-P= tres ciclos de pradera (alfalfa+ovillo); P-M-A= pradera, maíz, avena; P-P-A= dos ciclos de pradera+ avena forrajera).

^{3, 4, 5}en residuos de pradera (P), maíz (M) y en avena forrajera+raigrás (A)

Como se observa en el Cuadro 9, la rotación de cultivos que proporcionó la mayor cantidad de residuos orgánicos correspondió a P-M-A con 22200 kg MS ha⁻¹, seguida por la de P-P-A con 17700 kg MS ha⁻¹ y la de P-P-P con 13300 kg MS ha⁻¹. De los tres cultivos que se incluyeron en las rotaciones, la pradera de alfalfa+ovillo (P) fue la que generó la mayor cantidad de biomasa de residuos (13300 kg ha⁻¹), comparada con la de maíz (4500 kg ha⁻¹) y avena (4400 kg ha⁻¹). En cuanto a la concentración de nitrógeno, ésta fue de 2.2 %, 1.9 % y 1.3 % para los residuos de pradera (alfalfa+ovillo), maíz y avena, respectivamente, con relaciones carbono nitrógeno de 20, 70 y 26 en el mismo orden. La concentración de N en los residuos así como su relación C:N son los criterios más utilizados y considerados como de los más importantes en lo que se refiere al tratamiento y fertilización de los suelos (Espinoza, 2004). Es conocido que con la





adición al suelo de materiales orgánicos con una relación C:N amplia (>30) como son los residuos de maíz y pajas de cereales como cebada y trigo, los microorganismos del suelo cuentan con una fuente importante de carbono pero limitante en N para formar su protoplasma celular y aún cuando el nitrógeno puede ser tomado del disponible en el suelo, su velocidad de descomposición es considerablemente menor que la de aquellos residuos con relaciones C:N menores al intervalo crítico (20-30), donde el N no es un factor limitante (Recous *et al.*, 2000). Dado que el suelo en promedio tiene una relación C:N de 10 a 12:1 y la de los microorganismos de 4 a 9:1, el nitrógeno, en consecuencia, es la clave de la cantidad de humus que queda después de la descomposición de los residuos vegetales. Con estos conceptos también se explica que al adicionar un material orgánico cuya relación C:N sea mayor de 30, el ataque por los microorganismos provoca una gran liberación de bióxido de carbono (CO_2) descendiendo la relación C:N hasta alcanzar el punto de equilibrio del suelo (relación 10 a 12:1) -pues el carbono va perdiéndose y el N se conserva- en cuyo momento las actividades de los microorganismos se ha reducido debido a una falta de oxidación fácil del carbono, este punto estable corresponde a la formación de humus (Rodríguez, 1999). Por consiguiente, la adición de residuos vegetales con una alta proporción de N o baja relación C:N como en el caso de la pradera alfalfa+ovillo, haría que los microorganismos desintegradores actúen en pequeña escala de actividad y las producciones de CO_2 se reduzcan al mínimo, en tanto que la adición de una gran proporción de residuos con una alta relación C:N como los restos de maíz, los microorganismos del suelo liberarían CO_2 en grandes cantidades con consecuencias en una menor acumulación de humus. Como la relación carbono orgánico y el humus del suelo es de alrededor de 1:1.7, la cantidad de materia orgánica que puede ser mantenida en cualquier suelo estará relacionada con la del nitrógeno orgánico presente (Wild, 1992). Debido a esto, los residuos derivados de praderas de leguminosas como trébol,+raigrás y alfalfa, contribuyen a incrementar la retención de carbono y nitrógeno en el suelo (Francis *et al.*, 1999; Gregorich *et al.*, 2001).





De las rotaciones ensayadas en esta investigación, si bien la de P-M-A aporta la mayor cantidad de residuos orgánicos ($22200 \text{ kg MS ha}^{-1}$) así como de nitrógeno (438 kg ha^{-1}), también hay una marcada variación en la relación C:N de éstos, siendo la de P-P-P y P-P-A las menos críticas. Algunos autores mencionan que las rotaciones de cultivos presentan numerosas ventajas comparadas con los sistemas de monocultivo. Algunas de estas ventajas se relacionan con la posibilidad de acumular mayor cantidad de residuos de distinta calidad que representan significativos aportes de C para el suelo (García, 2004). otros investigadores opinan que la cantidad de residuos orgánicos es más importante que la relación C:N en la conservación de la MO debido a que al devolver mayor cantidad de residuos se tiende a un nivel de equilibrio superior al que se obtiene con rotaciones que generan menos residuos (Wild, 1992; Francis *et al.*, 1999).





5.4 Efecto de la rotación de cultivos en el Contenido de Materia Orgánica en el suelo

En la Figura 10 se presenta la influencia de las diferentes rotaciones de cultivo en el contenido de materia orgánica a la profundidad 0 – 30 cm (Figura 10a) y 30 – 60 cm (Figura 10b).

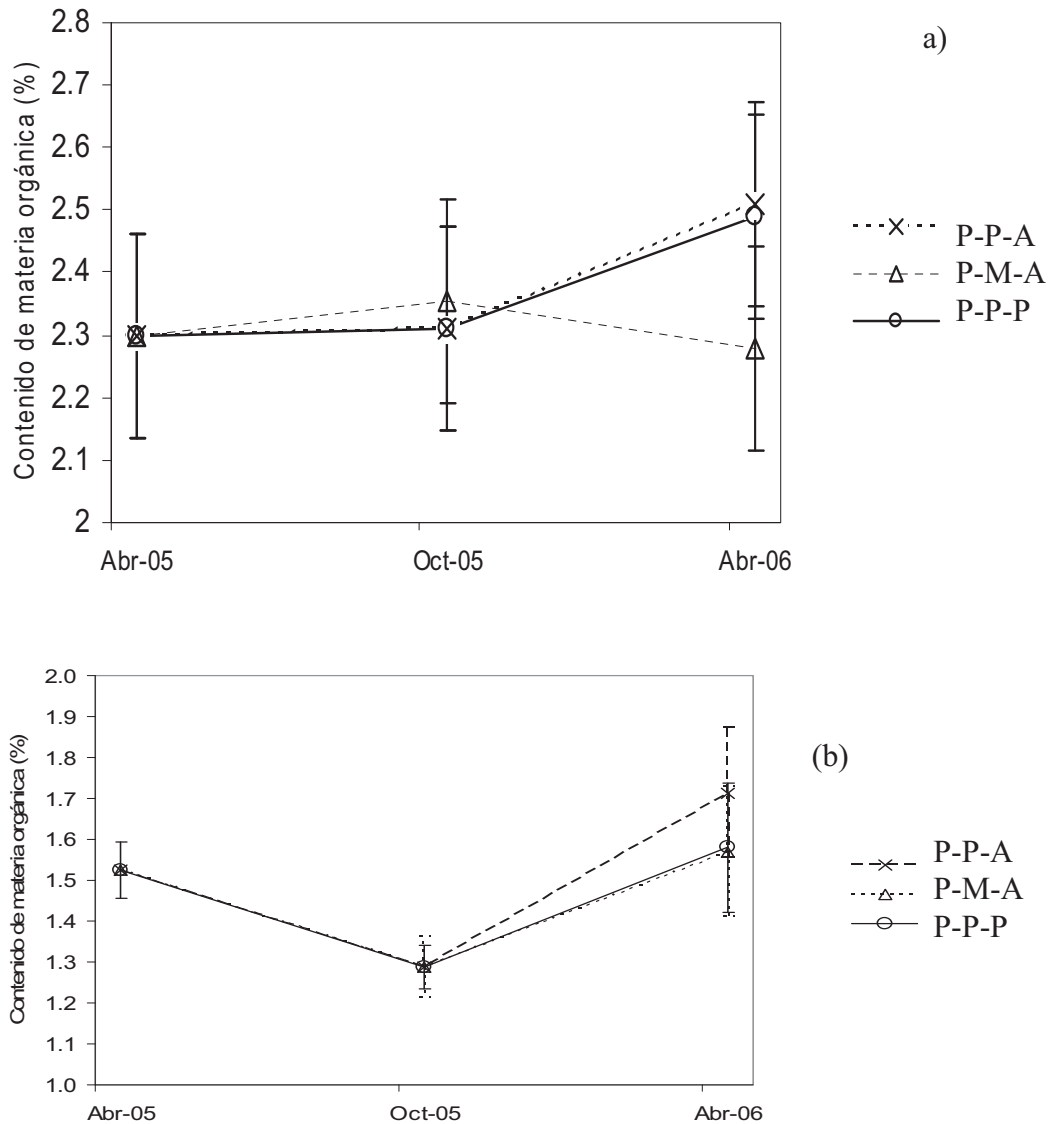


Figura 10. Contenido de materia orgánica del suelo en la profundidad (a) 0-30 cm y (b) 30-60 bajo diferentes rotaciones en tres momentos del año. (Las barras verticales indican error estándar) (Zecaída, 2006)





Puede observarse en la Figura 10a que las diferentes rotaciones de cultivo generaron fluctuaciones en el contenido de materia orgánica en la profundidad 0 a 30 cm pero hasta el final de cada rotación y éstas no fueron significativas (Cuadro 10). A esta profundidad se hubiese esperado un mayor contenido de MO con la rotación P-M-A, ya que en esta se incorporó la mayor proporción de productos carbonáceos a través de los residuos (22 200 kg MS en promedio), de nitrógeno total (438 kg ha⁻¹) y que el nitrógeno inorgánico o disponible en el suelo no fue un factor limitante pero, incluso tendió a disminuir al final del experimento, posiblemente por el mayor laboreo o movimiento del suelo al sembrar el maíz y posteriormente la avena, lo cual propicia la desprotección física favoreciendo con ello la mineralización de la MOF (Rodríguez, 1993). Studdert y Echeverría (2002) evaluaron la evolución del carbono orgánico del suelo en seis años de cultivo con rotaciones de praderas (P) y cultivos agrícolas (A) en distintas proporciones, bajo siembra directa y labranza convencional. En labranza convencional, la mayor cantidad de carbono orgánico se consiguió con la rotación 100% de P seguida por la de 50%P-50%A; 25%P-75%A y la menor acumulación de carbono con la rotación 100%A. En condiciones de siembra directa, la mayor acumulación de carbono también se consiguió con la rotación 100%P, en tanto que con el resto de las rotaciones, la variaciones en la acumulación de carbono fueron similares y no significativamente distintas. Este comportamiento se atribuyó a la menor remoción del suelo con la siembra directa y en consecuencia a una menor oxidación de los residuos incorporados. En suelos Oxisoles de Brasil, Sá *et al.* (2001) encontraron que la acumulación de carbono orgánico del suelo en la profundidad 0 a 20 cm después de varios años de cultivo con labranza convencional, siembra directa y pradera perenne fue en el siguiente orden: 65.6, 74.1 y 77.1 Mg ha⁻¹. Los aumentos en el carbono orgánico estuvieron estrechamente relacionados ($R^2=0.74$) con la cantidad de residuos aportados. Los autores también atribuyeron el incremento a la mayor protección del carbono orgánico del suelo bajo siembra directa y pradera perenne, a la formación de agregados estables del tamaño de arenas y limos especialmente en la profundidad 0 a 10 cm.





El contenido de materia orgánica disminuyó con la profundidad (Figura 10b) en aproximadamente 1%, comparado con el encontrado a la profundidad 0-30 cm en los tres muestreos y bajo las tres rotaciones. Esto es de esperarse dado que en los primeros 30 cm los residuos son incorporados a través de la labranza quedando con menor influencia las capas más profundas (Whitehead, 1995).

A diferencia de la primera capa, el tipo de rotación de cultivos afectó significativamente el contenido de materia orgánica en la profundidad 30 – 60 cm (Figura 10b, Cuadro 10). Un efecto importante en la materia orgánica se manifestó al término de las rotaciones. El contenido de materia orgánica se incrementó significativamente a 1.72% con la rotación P-P-A respecto al contenido de materia orgánica alcanzado por P-P-P y P-M-A en octubre de 2005 (1.23%). Este efecto aditivo se atribuye a una mayor incorporación de residuos ($17\ 700\ \text{kg MS ha}^{-1}$) que en P-P-P ($13\ 300\ \text{kg MS ha}^{-1}$) y a un menor efecto de laboreo que en P-M-A. Estos resultados deben tomarse como criterio de manejo si se quieren mejorar las condiciones físicas del suelo y con seguridad su productividad.

Hubo un descenso significativo del nivel inicial de materia orgánica (1.55% en promedio) en el segundo muestreo (octubre, 2005). En esta fecha, terminaba el ciclo del maíz en la rotación P-M-A, en el resto continuaba la pradera, sin embargo, en las tres rotaciones el descenso fue similar (1.3% en promedio). Este comportamiento fue semejante al observado en el nitrógeno total (Zecaida, 2006) y se le atribuyó a las condiciones benignas de temperatura y precipitación que favorecieron la mineralización de la materia orgánica fresca.





Cuadro 10. Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias de materia orgánica evaluada a dos profundidades en diferentes rotaciones en tres fechas de muestreo. (Zecaida, 2006)

¹ Comparación	Pr > t	
	Profundidad cm	
	0-30	30-60
P-P-P abril 05 vs. P-M-A octubre 05	0.794	0.030
P-P-P abril 05 vs. P-P-P octubre 05	0.945	0.013
P-P-P abril 05 vs. P-M-A abril 06	0.892	0.802
P-P-P abril 05 vs. P-P-A abril 06	0.231	0.290
P-P-P -abril 05 vs. P-P-P abril 06	0.282	0.754
P-M-A octubre 05 vs. P-P-P octubre 05	0.860	0.998
P-M-A octubre 05 vs. P-M-A abril 06	0.768	0.124
P-M-A octubre 05 vs. P-P-A abril 06	0.563	0.025
P-M-A octubre 05 vs. P-P-P abril 06	0.620	0.110
P-P-P octubre 05 vs. P-M-A abril 06	0.879	0.108
P-P-P octubre 05 vs. P-P-A abril 06	0.374	0.019
P-P-P octubre 05 vs. P-P-P abril 06	0.428	0.095
P-M-A abril 06 vs. P-P-A abril 06	0.328	0.527
P-M-A abril 06 vs. P-P-P abril 06	0.375	0.961
P-P-A abril 06 vs. P-P-P abril 06	0.925	0.559

¹P-P-P= tres ciclos de pradera (alfalfa+ovillo); P-M-A= pradera, maíz, avena; P-P-A= dos ciclos de pradera+ avena forrajera).

**Significativo \leq al 1 %

* Significativo al 5%





5.5 Efecto de la rotación de cultivos en la calidad de la materia orgánica

En el Cuadro 11 se muestran los resultados de los pesos de los ácidos húmicos (AH) y fúlvicos (AF) a dos profundidades de acuerdo al tipo de rotación.

Cuadro 11. Contenido de ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y total de sustancias húmicas en el suelo a dos profundidades, derivados de tres rotaciones de cultivos.

Profundidad —cm—	¹ Rotación de cultivos	Sustancias húmicas								
		—AH+AF—		—AH—		—AF—				
	Abril 05	Octubre 05	Abril 06	Octubre 05	Abril 06	Octubre 05	Abril 06			
		mg g ⁻¹ suelo								
0-30	P-P-P	39.26 (3.88) ²	60.03 (3.86)	62.33 (14.19)	8.44 (2.58)	26.81 (3.49)	32.44 (11.24)	30.81 (3.03)	33.22 (1.17)	29.89 (6.85)
	P-M-A	39.26 (3.88)	59.22 (0.96)	68.22 (5.10)	8.44 (2.58)	26.67 (2.65)	34.67 (3.79)	30.81 (3.03)	32.56 (1.71)	33.56 (1.50)
	P-P-A	39.26 (3.88)	60.03 (3.86)	57.22 (4.29)	8.44 (2.58)	26.81 (3.49)	23.56 (3.10)	30.81 (3.03)	33.22 (1.17)	33.67 (1.20)
30-60	P-P-P	42.22 (3.62)	94.61 (10.95)	63.00 (9.33)	8.15 (2.86)	61.50 (11.11)	29.44 (7.92)	34.07 (1.89)	33.11 (0.62)	33.56 (1.50)
	P-M-A	42.22 (3.62)	88.11 (16.00)	64.56 (6.74)	8.15 (2.86)	55.22 (17.33)	30.22 (6.20)	34.07 (1.89)	32.89 (1.35)	34.33 (0.58)
	P-P-A	42.22 (3.62)	94.61 (10.95)	65.78 (6.01)	8.15 (2.86)	61.50 (11.11)	31.44 (6.19)	34.07 (1.89)	33.11 (0.62)	34.33 (0.88)

¹P-P-P= tres ciclos de pradera (alfalfa+ovillo); P-M-A= pradera, maíz, avena; P-P-A= dos ciclos de pradera+ avena forrajera).

²Desviación estándar.





En general, se puede observar que el contenido total de sustancias húmicas se incrementó significativamente conforme avanzó la rotación de cultivos en la profundidad 0 a 30 cm y 30 a 60 cm (Cuadro 12), pero en la capa 30 a 60 cm, la mayor acumulación de sustancias húmicas se presentó en el segundo ciclo de rotación (92.4 mg g⁻¹ de suelo, promedio de las rotaciones). Del inicio del experimento al término de las rotaciones, el contenido de sustancias húmicas se incrementó significativamente en 59.3% en la profundidad 0 a 30 cm y en 34% en la profundidad 30 a 60 cm, promedio de las rotaciones. Sin embargo, el tipo de rotación no afectó el contenido final de sustancias húmicas, las cuales fluctuaron de 57.2 a 68.2 mg g⁻¹ de suelo en la profundidad 0 a 30 cm y de 63 a 65.8 mg g⁻¹ de suelo en la profundidad 30 a 60 cm.

Cuadro 12. Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias de la suma de los contenidos de ácidos húmicos y fúlvicos evaluados a dos profundidades en tres rotaciones de cultivos forrajeros en distintas fechas de muestreo.

Comparación	—Profundidad cm—	
	0-30	30-60
	Pr> t	
¹ P-P-P abril 05 vs. P-M-A octubre 05	<0.0001*	<0.0001*
P-P-P abril 05 vs. P-P-P octubre 05	<0.0001*	<0.0001*
P-P-P abril 05 vs. P-M-A abril 06	<0.0001*	<0.0001*
P-P-P abril 05 vs. P-P-A abril 06	0.0028*	<0.0001*
P-P-P -abril 05 vs. P-P-P abril 06	0.0003*	<0.0001*
P-M-A octubre 05 vs. P-P-P octubre 05	0.7302	0.5113*
P-M-A octubre 05 vs. PM-A abril 06	0.1105	0.0146*
P-M-A octubre 05 vs. P-P-A abril 06	0.7134	0.0196*
P-M-A octubre 05 vs. P-P-P abril 06	0.5696	0.0099*
P-P-P octubre 05 vs. P-M-A abril 06	0.1322	0.0003*
P-P-P octubre 05 vs. P-P-A abril 06	0.5962	0.0004*
P-P-P octubre 05 vs. P-P-P abril 06	0.6628	0.0002*
P-M-A abril 06 vs. P-P-A abril 06	0.1390	0.8199
P-M-A abril 06 vs. P-P-P abril 06	0.4188	0.7715
P-P-A abril 06 vs. P-P-P abril 06	0.4815	0.6053

P-P-P= tres ciclos de pradera (alfalfa+ovillo); P-M-A= pradera, maíz, avena; P-P-A= dos ciclos de pradera+ avena forrajera).





Se habría esperado un mayor contenido de sustancias húmicas en la primera capa dado que es la más influenciada por el aporte de residuos, sin embargo, éstas fueron muy similares. La formación de sustancias húmicas es vital para la estabilidad de agregados además de influenciar el intercambio iónico (ionización de H, de grupos carboxilo, fenólico y de OH⁻ que generan cargas negativas o positivas mediante la protonización de grupos amino), interviene en la liberación de nutrimentos como N, S y micronutrimentos (Stevenson, 1994). Cruz-Flores *et al* (en prensa) encontraron que el contenido de sustancias húmicas en suelos forestales del parque Nacional Izta-popo variaba dependiendo del tipo de especie forestal, con contenidos que iban de 41.5, 12.6 y 90.7 mg g⁻¹ de suelo para una asociación pastizal-*Abies religiosa*, *Pinus sp* y *Abies-Pinus*, respectivamente. Si bien el contenido total de sustancias húmicas formadas es importante, la proporción de ácidos húmicos y fúlvicos presentes en éste es un mejor indicador del grado de condensación y por tanto de estabilidad de dichas sustancias. Los ácidos fúlvicos contienen mucho más oxígeno pero significativamente menos carbono y con ello contiene más grupos funcionales de tendencia ácida especialmente grupos –COOH, -OH y –C=O en los que se encuentra casi en su totalidad el oxígeno contenido en ellos, mientras que en los ácidos húmicos, el oxígeno se encuentra como componente de núcleos de enlaces éter o éster (Ganuza, 2006) Independientemente del tipo de rotación, la cantidad de ácidos húmicos se incrementó significativamente con el tiempo hasta el final de la rotación en ambas profundidades (Cuadro 13); los contenidos variaron de 8.44 mg g suelo⁻¹ al inicio del experimento hasta alcanzar valores de 34.67 mg g suelo⁻¹ en la profundidad 0 a 30 cm y de 8.15 a 61.50 mg/g suelo en la segunda capa. A diferencia del comportamiento de los ácidos húmicos, la cantidad de ácidos fúlvicos presentes al inicio del experimento no fue afectada significativamente por el tipo de rotación ni al término de éstas (Cuadro 14), en promedio, la fluctuación del contenido de AF fue de 30.8 mg g⁻¹ suelo al inicio de los tratamientos hasta a 33.7 mg g⁻¹ suelo al final de la rotación, para la profundidad 0-30 cm y entre los 34.07 a 34.1 mg g⁻¹ para la profundidad 30-60 cm. Es importante señalar que hubo un descenso significativo en el contenido de AF en el segundo muestreo, que asociado con el comportamiento de la materia orgánica del suelo discutido en párrafos anteriores,





indicaría que el descenso observado en el segundo muestreo, se debió a una rápida mineralización de los AF más que de los húmicos, lo que se reflejó en un menor contenido final de materia orgánica con la rotación P-M-A.

Cuadro 13. Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias del contenido de ácidos húmicos evaluado a dos profundidades en tres rotaciones de cultivos forrajeros en diferentes fechas de muestreo.

Comparación	—Profundidad cm—	
	0-30	30-60
	—Pr> t —	
P-P-P abril 05 vs. P-M-A octubre 05	<.0001*	<.0001*
P-P-P abril 05 vs. P-P-P octubre 05	<.0001*	<.0001*
P-P-P abril 05 vs. P-M-A abril 06	<.0001*	<.0001*
P-P-P abril 05 vs. P-P-A abril 06	0.0024*	<.0001*
P-P-P -abril 05 vs. P-P-P abril 06	<.0001*	<.0001*
P-M-A octubre 05 vs. P-P-P octubre 05	0.9598	0.5056
P-M-A octubre 05 vs. PM-A abril 06	0.1103	0.0082*
P-M-A octubre 05 vs. P-P-A abril 06	0.5219	0.0112*
P-M-A octubre 05 vs. P-P-P abril 06	0.2412	0.0067*
P-P-P octubre 05 vs. P-M-A abril 06	0.0984	0.0001*
P-P-P octubre 05 vs. P-A abril 06	0.4813	0.0002*
P-P-P octubre 05 vs. P-P-P abril 06	0.2276	0.0001*
P-M-A abril 06 vs. P-P-A abril 06	0.0807	0.8245
P-M-A abril 06 vs. P-P-P abril 06	0.7164	0.8872
P-P-A abril 06 vs. P-P-P abril 06	0.1563	0.7164

P-P-P= tres ciclos de pradera (alfalfa+ovillo); P-M-A= pradera, maíz, avena; P-P-A= dos ciclos de pradera+ avena forrajera).

Al evaluar el efecto de la diversidad de residuos derivados de diferentes rotaciones de cultivos forrajeros en la cantidad de materia orgánica del suelo con base en los pesos de los ácidos húmicos y fúlvicos y la suma de ambos se tiene que las rotaciones P-P-P y P-P-A formaron la mayor cantidad de ácidos húmicos y fúlvicos, cuyo efecto aditivo resultó en mayores contenidos de MO en la profundidad 0 a 30 cm y 30-60 que con P-M-A. Esta diferencia indica que el tipo de rotación influye en la dinámica de transformación de la MO. La falta de significancia estadística en la propiedad MO muestra que es un indicador débil para evaluar el impacto de las prácticas de manejo del suelo.





Cuadro 14. Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias del contenido de ácidos fúlvicos evaluado a dos profundidades en tres rotaciones de cultivos forrajeros en distintas fechas de muestreo.

Comparación	—Profundidad cm—	
	0-30	30-60
	—Pr> t —	
P-P-P abril 05 vs. P-M-A octubre 05	0.0887	0.0934
P-P-P abril 05 vs. P-P-P octubre 05	0.0171*	0.1207
P-P-P abril 05 vs. P-M-A abril 06	0.2052	0.6642
P-P-P abril 05 vs. P-P-A abril 06	0.1884	0.6681
P-P-P -abril 05 vs. P-P-P abril 06	0.6617	0.3977
P-M-A octubre 05 vs. P-P-P octubre 05	0.2241	0.6880
P-M-A octubre 05 vs. PM-A abril 06	0.6138	0.0164*
P-M-A octubre 05 vs. P-P-A abril 06	0.5756	0.0166*
P-M-A octubre 05 vs. P-P-P abril 06	0.1866	0.2397
P-P-P octubre 05 vs. P-M-A abril 06	0.8637	0.0137*
P-P-P octubre 05 vs. P-A abril 06	0.8196	0.0139*
P-P-P octubre 05 vs. P-P-P abril 06	0.0993	0.3359
P-M-A abril 06 vs. P-P-A abril 06	0.9678	0.9943
P-M-A abril 06 vs. P-P-P abril 06	0.1880	0.1045
P-P-A abril 06 vs. P-P-P abril 06	0.1757	0.1058

-P-P= tres ciclos de pradera (alfalfa+ovillo); P-M-A= pradera, maíz, avena; P-P-A= dos ciclos de pradera+ avena forrajera).

5.6 Grado de condensación de los ácidos húmicos y fúlvicos

La absorción de la radiación UV-VIS por las sustancias húmicas está definida por el grado de condensación de los anillos aromáticos presentes en las estructuras, la relación entre el carbono contenido en las estructuras aromáticas y alifáticas; el contenido total de carbono y el peso molecular. La relación de la absorción de la radiación UV-VIS (665-465 nm) conocida como E_4/E_6 permite inferir sobre el grado de aromaticidad de las moléculas de las sustancias húmicas. Entre menor sea el valor de la relación implica un alto grado de aromaticidad y valores altos indican un mayor contenido de cadenas alifáticas (Rivero, 1994).





El en Cuadro 15 se muestra el grado de condensación de los ácidos húmicos y fúlvicos después de cada ciclo de cultivo y al final de la rotación. Los valores de grado de condensación fluctuaron de 3.99 a 5.65 unidades en la profundidad 0 a 30 cm y entre 4.09 a 4.87 en la segunda capa, en tanto que los ácidos fúlvicos de 4.31 a 7.37 y de 3.98 a 7.11 a las mismas profundidades, respectivamente. Investigaciones de Schnitzer (1977, citado en Rivero, 1994), en suelos tropicales, encontró valores de E_4/E_6 para los ácidos húmicos entre 5.0 y 5.8 unidades.

Cuadro 15. Grado de condensación de los ácidos húmicos y fúlvicos en rotación de cultivos

Profundidad ——cm——	¹ Rotación	E4/E6 AH			E4/E6 AF		
		Abril 05	Octubre 05	Abril 06	Abril 05	Octubre 05	Abril 06
30 cm	P-P-P	3.99 ² (0.13)	4.38 (0.34)	5.35 (0.14)	4.31 (0.95)	5.94 (3.17)	6.26 (3.47)
	P-M-AP	3.99 (0.13)	4.52 (0.41)	5.65 (0.76)	4.31 (0.95)	6.50 (2.78)	4.40 (1.83)
	P-P-AP	3.99 (0.13)	4.38 (0.34)	4.69 (0.14)	4.31 (0.95)	5.94 (3.17)	7.37 (5.79)
30-60	P-P-P	4.09 (0.12)	4.12 (0.57)	4.64 (0.09)	3.98 (0.50)	3.36 (2.09)	7.11 (1.17)
	P-M-A	4.09 (0.12)	4.31 (0.43)	4.48 (0.58)	3.98 (0.50)	3.50 (0.50)	4.81 (0.76)
	P-P-A	4.09 (0.12)	4.12 (0.57)	4.87 (0.86)	3.98 (0.50)	3.36 (2.09)	3.17 (1.16)

¹P-P-P= tres ciclos de pradera (alfalfa+ovillo); P-M-A= pradera, maíz, avena; P-P-A= dos ciclos de pradera+ avena forrajera).

²Desviación estándar.

Independientemente del uso del suelo, el grado de condensación de los ácidos húmicos y fúlvicos en la profundidad 0 a 30 cm disminuyó al término de la rotación (Figura 11 a, b y c), lo que indicaría un mayor contenido de cadenas alifáticas, sin embargo, con el uso del suelo P-P-A la velocidad de disminución para los ácidos húmicos fue menor (0.320 unidades d^{-1}) que en P (0.65 unidades d^{-1}) y que en P-M-A (0.798 unidades d^{-1}). Un comportamiento similar se observó en el grado de condensación de los ácidos húmicos en la profundidad 30 a 60 cm (Figura 11 d, e y f); a diferencia de éstos, el grado de condensación de los ácidos fúlvicos se incrementó con la rotación P-P-A, confirmando el beneficio en la calidad del suelo con este manejo. Estos resultados podrían indicar una mayor protección de la materia orgánica formada





con la rotación P-P-A y en consecuencia de resistencia en el tiempo y podrían tomarse como criterio de manejo si se quieren mejorar las condiciones físicas del suelo y con seguridad su productividad.

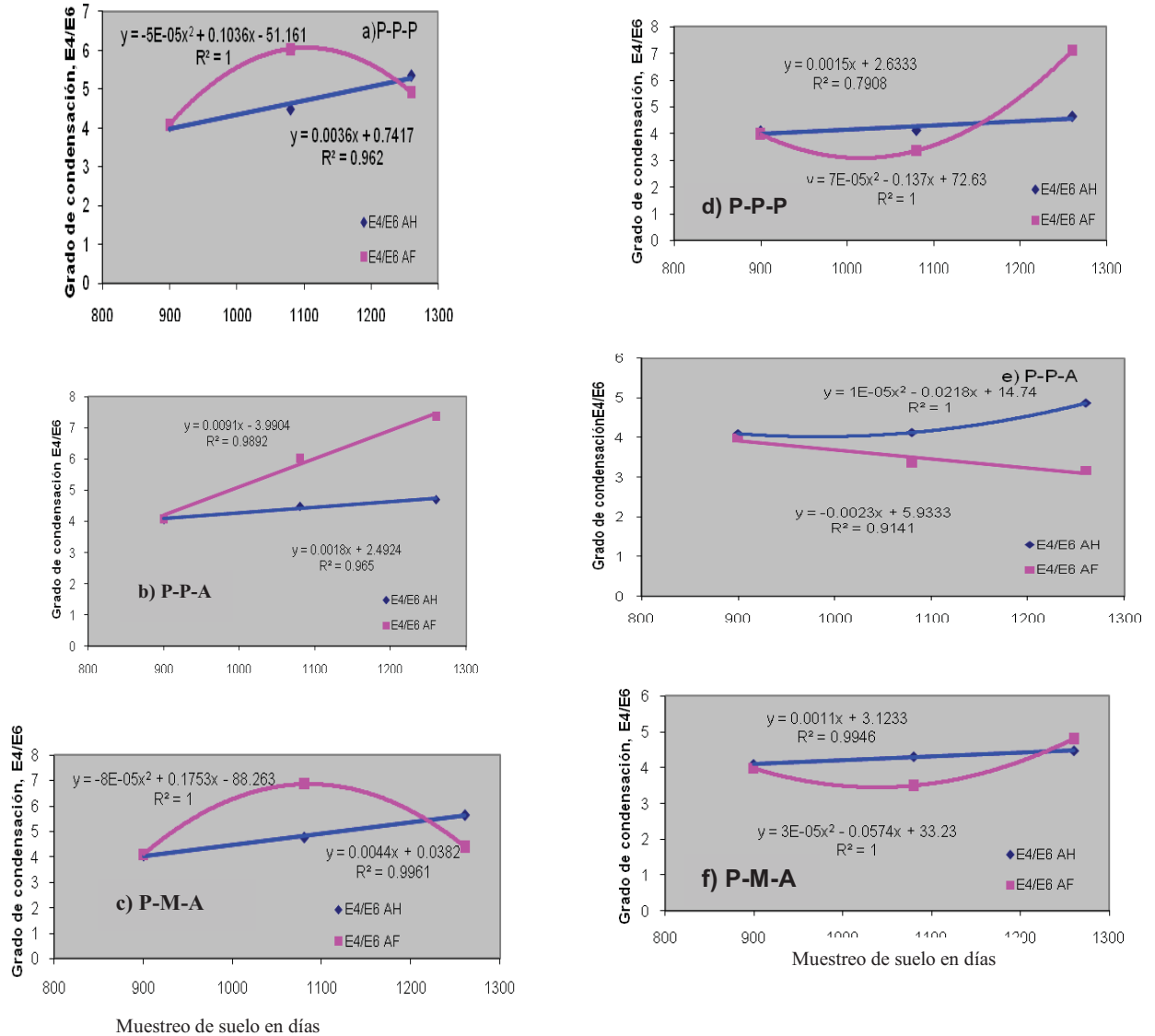


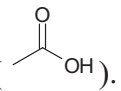
Figura 11 (a,b,c,d,e,f). Comportamiento del grado de condensación de los ácidos húmicos y fúlvicos durante el desarrollo de las rotaciones.





5.7 Grupos funcionales presentes en las fracciones húmicas

5.7.1 Ácidos húmicos. El análisis del espectro de los ácidos húmicos presentes en el suelo al inicio de los tratamientos (pradera de alfalfa+raigrás de 2 años y medio de cultivo) a la profundidad 0 a 30 cm muestra una señal fina en 3629.1 cm^{-1} que indica la presencia de -N-H ; la señal en 3445.9 cm^{-1} es una señal ancha indicativa de -O-H de alcohol y fenol (Figura 12). La señal a 2921.2 cm^{-1} se debe a las vibraciones longitudinales de los enlaces de CH , CH_2 y CH_3 de tipo alifático. Se observa una señal débil, ancha en 1653.7 cm^{-1} , que indica la presencia de doble enlaces de tipo alifático y presencia de sales de amonio aromáticas =C-NH^+ . Se presenta una señal en 1200.5 cm^{-1} característica de la vibración de deformación del enlace -C-O-H de fenoles y la señal de 1034.5 cm^{-1} para alcoholes. La señal de 910.2 cm^{-1} puede tener su origen por la presencia de dobles enlaces del tipo alqueno. Se hace notar que en estas muestras que siguieron el proceso de aislamiento para ácidos húmicos no presentan la señal característica en 1715 cm^{-1} para el doble enlace C=O del grupo carbonilo presente en el

grupo funcional de ácido carboxílico presente en los ácidos húmicos ()

El análisis de los espectros para el mismo tratamiento a la profundidad 30 a 60 cm^{-1} tuvieron en general las mismas señales, que indican, en todos los casos, que las sustancias húmicas presentan los mismos grupos funcionales ya descritos, con algunas diferencias en la intensidad de la señal. Por tanto, la profundidad no influyó en la formación de grupos funcionales diferentes.



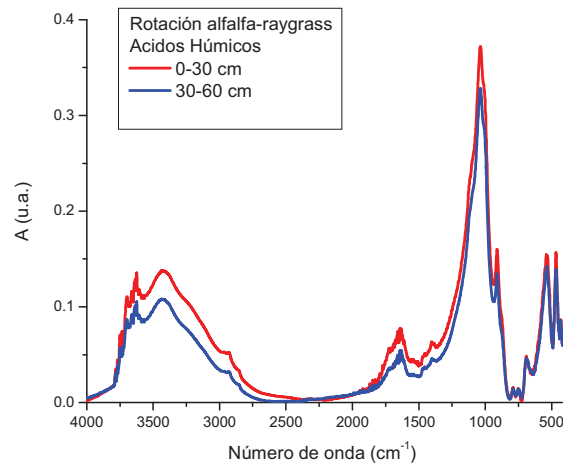


Figura 12. Espectro en el IR de los ácidos húmicos presentes en el suelo en la profundidad 0 a 30 y 30 a 60 cm al inicio del experimento.

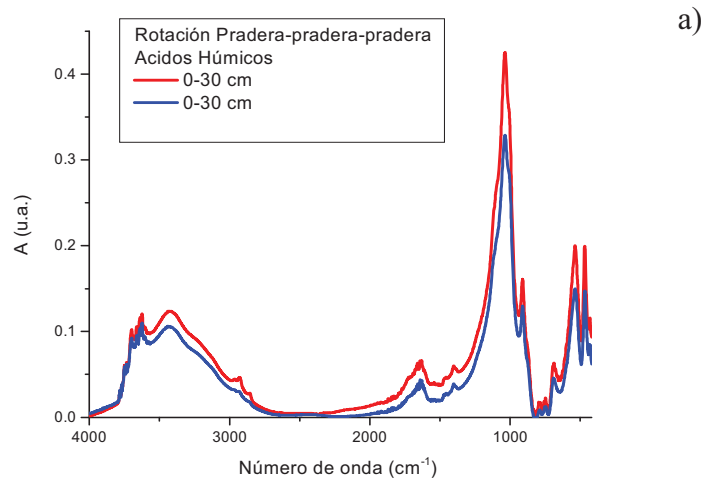
El análisis del espectro en el Infrarrojo de los ácidos húmicos al final de la rotación del tratamiento Pradera-Pradera-Pradera (P-P-P), profundidad 0 a 30 cm muestran señales a 3629.9 cm^{-1} que indica la presencia de $-\text{N-H}$, la señal en 3447.8 cm^{-1} es una señal ancha que muestra la presencia de $-\text{O-H}$ de alcoholes y fenoles (Figura 13a). La señal que se encuentra en 2921.2 cm^{-1} se debe a las vibraciones longitudinales de los enlaces de CH , CH_2 y CH_3 provenientes de cadenas alifáticas; se observa una señal débil en 1654.0 cm^{-1} , indica la presencia de dobles enlaces aromáticos y alifáticos. La señal en 1034.5 cm^{-1} muestra la presencia de $-\text{C-O-H}$ provenientes de alcoholes, la señal a 910.7 cm^{-1} presenta una señal de $\text{C}=\text{C}$ en formación de alquenos. No se observan las señales características de los ácidos carboxílicos, así como tampoco se presentan la señal ni como un pequeño hombro en 1200 cm^{-1} que nos indique la presencia de fenoles. En la profundidad 30 a 60 cm para la misma rotación (P-P-P) el análisis del espectro en el Infrarrojo de los ácidos húmicos muestran señales similares que las sustancias húmicas colectadas de 0-30 cm. Estas señales son 3628.7 cm^{-1} , 3422.4 cm^{-1} , para los enlaces N-H , O-H (alcoholes y fenoles), la señal del $-\text{O-H}$ no se relaciona con un grupo funcional de ácido carboxílico debido a que no está presente la señal a 1710 cm^{-1} aproximadamente, característica del enlace carbono doble enlace oxígeno del ácido carboxílico. La señal a 2921.2 cm^{-1} , nuevamente se debe a la presencia de los enlaces C-H de cadenas de alcanos, 1653.7 cm^{-1} para los dobles enlaces tipo alqueno, las señales a 1150.0 cm^{-1} (hombro) y 1033.9 cm^{-1} se deben a la presencia





de enlaces -C-O- presente en alcoholes primarios y secundarios, no se observa la señal ni como un pequeño hombro en 1200 cm^{-1} que nos indique la presencia de fenoles. En este tipo de rotación es importante hacer notar la ausencia de ácidos carboxílicos y fenoles, es indicativo de un estadio menos evolucionado (oxidado) de los compuestos precursores de las sustancias húmicas.

El análisis de los espectros para la rotación Pradera-Maíz-Avena (P-M-A) a la profundidad de 0-30 cm y 30 a 60 cm (Figura 13b) presentaron señales similares (3628.3 cm^{-1} , 3422.4 cm^{-1} , 2932.1 cm^{-1} , 1637.3 cm^{-1} , 1034.5 cm^{-1} y 910.8 cm^{-1}) a los ácidos húmicos aislados del suelo de la rotación Pradera-Pradera-Pradera (P-P-P) En los espectros en el infrarrojo de los ácidos húmicos correspondientes no se observa nuevamente las señales debidas a los ácidos carboxílicos y fenoles.



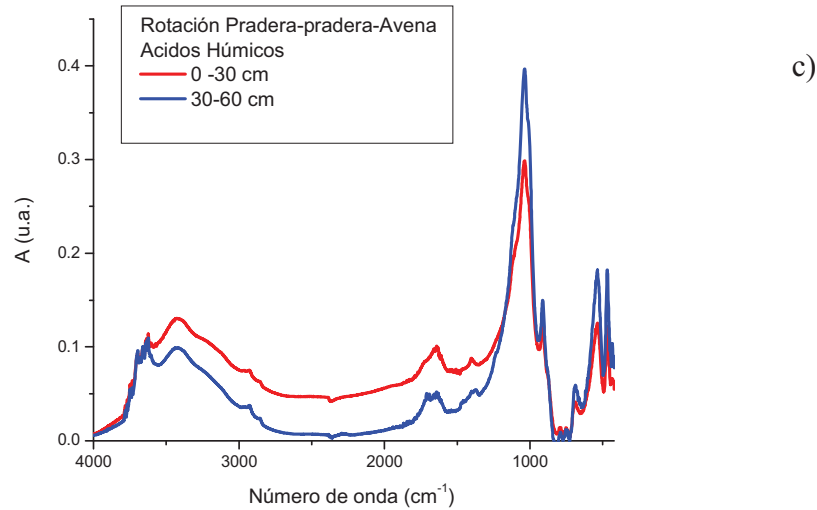
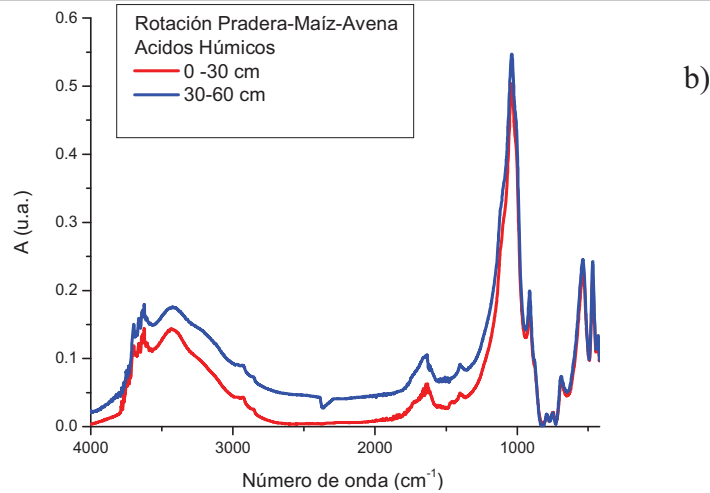


Figura 13 (a, b, c). Espectro en el IR de los ácidos húmicos presentes en el suelo en la profundidad 0 a 30 y 30 a 60 cm al término de las rotaciones.

El análisis de los espectros de los ácidos húmicos provenientes de la rotación Pradera-Pradera-Avena (P-P-A) a una profundidad de 0-30 cm, y a la profundidad 30 a 60 cm (Figura 13c), presentaron señales similares (3629.4 cm^{-1} , 3446.6 cm^{-1} , 2921.2 cm^{-1} , 1654.0 cm^{-1} , 1034.6 cm^{-1} , 910.3 cm^{-1}) a los ácidos húmicos aislados del suelo colectado de la rotación Pradera-Pradera-Pradera (P-P-P) y del proveniente de la rotación Pradera-Maíz-Avena. (P-M-A) De manera similar en estas tres rotaciones de observa ausencia de las señales que permitan identificar los grupos funcionales ácido carboxílico ($3400\text{ y }1710\text{ cm}^{-1}$) y fenol ($3400\text{ y }1200\text{ cm}^{-1}$).





5.7.2 Ácidos fúlvicos. La concentración de grupos funcionales ácidos en los ácidos fúlvicos usualmente es más elevada que en los ácidos húmicos (Mortvedt *et al.* 1983). Los espectros en el infrarrojo de los ácidos fúlvicos presentes en el suelo al inicio de las rotaciones (pradera de alfalfa+raigrás de 2 años y medio de cultivo) (Figura 14) en la profundidad 0 a 30 cm y 30 a 60 cm, presentan señales similares, 3468.1 cm^{-1} , se observa una señal fina que puede ser asignada a N-H posiblemente tipo amida ya que en la región de 1680.0 cm^{-1} hasta 1654.2 cm^{-1} , se observa una señal ancha en donde se puede tener los enlaces C=O tanto para amidas como para ácidos carboxílicos. Se observa una señal ancha desde 3500.0 hasta 2800.0 cm^{-1} característica para enlaces -O-H de ácidos carboxílicos, en esta señal se puede incluir este tipo de enlace en fenoles y alcoholes. La presencia de fenoles se comprueba con la señal tipo hombro que se observa en 1245.5 cm^{-1} , y los alcoholes se pueden comprobar por la presencia de la señal a 1158.3 cm^{-1} , 1085.4 cm^{-1} asignable a el enlace -C-O- para alcoholes primarios y secundarios, la señal a 968.5 cm^{-1} y 880.8 cm^{-1} indica la presencia de dobles enlaces aromáticos.



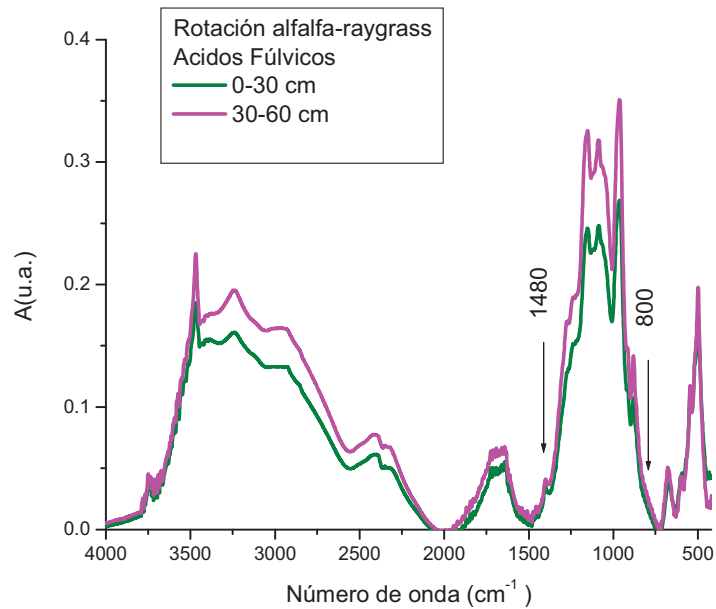


Figura 14. Espectro en el IR de los ácidos fúlvicos presentes en el suelo en la profundidad 0 a 30 y 30 a 60 cm al inicio del experimento.

Los ácidos fúlvicos aislados de las muestra de suelo provenientes de la rotación Pradera-Pradera-Pradera (P-P-P) (Figura 15a), los aislados correspondientes a la rotación Pradera-Maíz-Avena(P-M-A) (Figura 15b), así como los ácidos fúlvicos aislados de la rotación Pradera-Pradera-Avena (P-P-A) (Figura 15c) a la profundidad 0 a 30 cm y 30 a 60 cm muestran espectros en el infrarrojo cada una de ellas muy similares, observándose una señal ancha en 3448.8 cm^{-1} , que indica la presencia de -O-H de alcoholes y fenoles notándose una drástica disminución de la señales que permiten identificar la presencia del grupo carboxilo, en 2932.0 cm^{-1} , se observa la señal típica para cadenas alifáticas (CH_3 , CH_2 , CH : alcanos), 1654.1 cm^{-1} , la señal de alargamiento del doble enlace $\text{C}=\text{C}$, se comprueba la presencia del enlace $-\text{C}-\text{O}-$ para fenoles con la señal a 1229.2 cm^{-1} , de alcoholes terciarios con la señal a 1169.2 cm^{-1} y alcoholes secundarios con la señal a 1092.9 cm^{-1} .



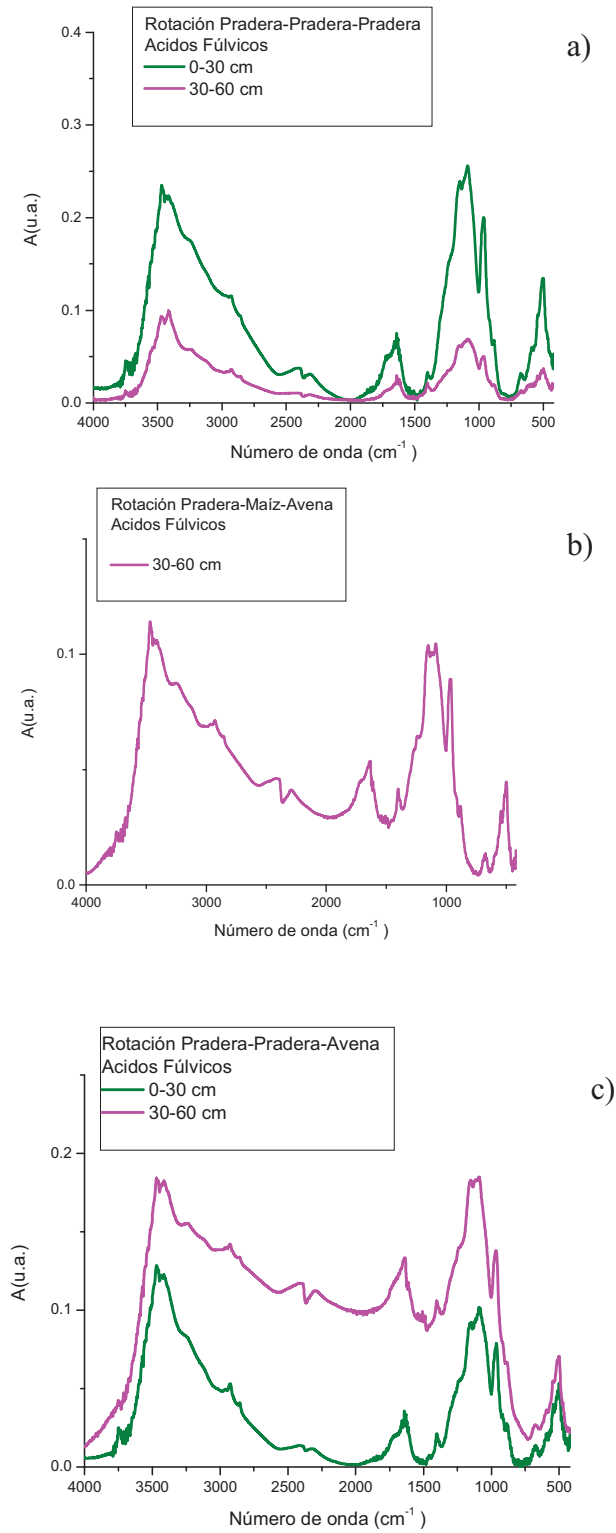


Figura 15 (a, b, c). Espectro en el IR de los ácidos fúlvicos presentes en el suelo en la profundidad 0 a 30 y 30 a 60 cm al término de las rotaciones.





CONCLUSIONES

La rotación de cultivos que proporcionó la mayor cantidad de residuos orgánicos correspondió a P-M-A con 22200 kg MS ha⁻¹, seguida por la de P-P-A con 17700 kg MS ha⁻¹ y la de P-P-P con 13300 kg MS ha⁻¹. De los tres cultivos que se incluyeron en las rotaciones, la pradera de alfalfa+ovillo (P) fue el que generó la mayor cantidad de biomasa de residuos (13300 kg ha⁻¹), comparada con la de maíz (4500 kg ha⁻¹) y avena (4400 kg ha⁻¹).

En cuanto a la concentración de nitrógeno, ésta fue de 2.2 %, 1.9 % y 1.3 % para los residuos de pradera (alfalfa+ovillo), maíz y avena, respectivamente, con relaciones carbono nitrógeno de 20, 70 y 26 en el mismo orden.

De las rotaciones ensayadas en esta investigación, si bien la de P-M-A aportó la mayor cantidad de residuos orgánicos (22200 kg MS ha⁻¹) así como de nitrógeno (438 kg ha⁻¹), también hubo una marcada variación en la relación C:N de éstos, siendo la de P-P-P y P-P-A las menos críticas para la actividad microbiana.

El contenido de materia orgánica en el suelo en la profundidad 0 a 30 cm no fue función de la cantidad de residuos ni del nitrógeno total incorporado a través de las diferentes rotaciones de cultivos. Las rotaciones de cultivo generaron fluctuaciones en el contenido de materia orgánica pero hasta el final de cada rotación y éstas no fueron significativas. A diferencia de la primera capa, el tipo de rotación de cultivos afectó significativamente el contenido de materia orgánica en la profundidad 30 a 60 cm al término de la rotación. El contenido de materia orgánica se incrementó significativamente a 1.72% con la rotación P-P-A respecto al contenido de materia orgánica alcanzado por P-P-P y P-M-A durante el segundo muestreo (1.23%). Este efecto aditivo se atribuyó a una mayor incorporación de residuos (17 700 kg MS ha⁻¹) que en P-P-P (13 300 kg MS ha⁻¹) y a un menor efecto de laboreo que en P-M-A.

El manejo del suelo a través de la rotación de cultivos influyó en la formación de ácidos húmicos y fúlvicos así como en el grado de condensación. En general, el contenido total de sustancias húmicas se incrementó significativamente conforme avanzó la rotación de cultivos en la profundidad 0 a 30 cm y 30 a 60 cm.





Del inicio del experimento al término de las rotaciones, el contenido de sustancias húmicas se incrementó en 59.3% en la profundidad 0 a 30 cm y en 34% en la profundidad 30 a 60 cm, promedio de las rotaciones. Sin embargo, el tipo de rotación no afectó el contenido final de sustancias húmicas las cuales fluctuaron de 57.2 a 68.2 mg g⁻¹ de suelo en la profundidad 0 a 30 cm y de 63 a 65.8 mg g⁻¹ de suelo en la profundidad 30 a 60 cm.

Las sustancias húmicas aisladas del suelo y a través de la técnica de espectroscopia de luz visible (E4/E6) fue posible determinar su calidad a partir del grado de condensación aromática. Independientemente del tipo de rotación de cultivos, el grado de condensación de los ácidos húmicos y fúlvicos en la profundidad 0 a 30 cm disminuyó al término de la rotación, lo que indicó un mayor contenido de cadenas alifáticas, mismo que se comprobó en el análisis del IR, sin embargo, con el uso del suelo P-P-A la velocidad de disminución para los ácidos húmicos fue menor (0.320 unidades d⁻¹) que en P-P-P (0.65 unidades d⁻¹) y que en P-M-A (0.798 unidades d⁻¹). Un comportamiento similar se observó en el grado de condensación de los ácidos húmicos en la profundidad 30 a 60 cm. A diferencia de éstos, el grado de condensación de los ácidos fúlvicos se incrementó con la rotación P-P-A, confirmando el beneficio en la calidad del suelo con este manejo.

Respecto a los grupos funcionales encontrados en los ácidos húmicos presentes en el suelo tanto al inicio como al término de las rotaciones a la profundidad 0 a 30 cm, las señales indicaron la presencia de -N-H; de -O-H de alcohol y fenol; enlaces de CH, CH₂ y CH₃ de tipo alifático, así como la presencia de doble enlaces de tipo alifático y de sales de amonio aromáticas =C-NH⁺; señales características de la vibración de deformación del enlace -C-O-H de fenoles y de alcoholes. También se identificó una señal que puede tener su origen por la presencia de dobles enlaces del tipo alqueno. Los mismos grupos funcionales fueron identificados en la profundidad 30 a 60 cm.

Los espectros en el infrarrojo de los ácidos fúlvicos presentes en el suelo al inicio de las rotaciones en la profundidad 0 a 30 cm y 30 a 60 cm, presentaron señales similares e indicativas de la presencia de N-H posiblemente tipo amida, enlaces -O-H de ácidos carboxílicos. Se comprobó la presencia de fenoles y de alcoholes primarios y secundarios, así como la presencia de dobles enlaces aromáticos.





Los ácidos fúlvicos aislados de las muestra de suelo provenientes de la rotación P-P-P, los correspondientes a la rotación P-M-A, así como los ácidos fúlvicos aislados de la rotación P-P-A a la profundidad 0 a 30 cm y 30 a 60 cm al término de la rotación, mostraron espectros en el infrarrojo muy similares, observándose señales que indicaron la presencia de -O-H de alcoholes y fenoles, de cadenas alifáticas (CH_3 , CH_2 , CH : alcanos), de alargamiento del doble enlace $\text{C}=\text{C}$. También se comprobó la presencia del enlace $-\text{C}-\text{O}-$ para fenoles, de alcoholes terciarios y alcoholes secundarios.

La ausencia de señales que permitieran identificar los grupos funcionales del ácido carboxílico y fenol en los aislados de ácidos húmicos y fúlvicos del suelo sometido a diferentes rotaciones de cultivo, es indicativo de que el proceso de humificación fue alterado y no se ha concluido hasta la formación de grupos funcionales oxidados como los ácidos carboxílicos, amidas o quinonas como se esperaría en el proceso normal. Por otra parte, la profundidad no influyó en la formación de grupos funcionales diferentes.





LITERATURA CITADA

- Aerts, R. 1997. Climate, leaf litter chemistry, and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Journal of Ecology*, 80, 439–449.
- Amishi, B. Joshi, D.R.V, Arthur, H. J. and Eric K. M. 2003. Nitrogen availability and forest productivity along a climosequence on Whiteface Mountain, New York. *Can. Journal. For. Res.* 33: 1880–1891.
- Ågren, G. I. and Bosatta, E. 1996. Quality: a bridge between theory and experiment in soil organic matter studies. – *Oikos* 76: 522–528.
- Ågren, G. I. and Bosatta, E. 1998. *Theoretical ecosystem ecology – understanding element cycles.* – Cambridge Univ. Press.
- Balesdent J. and M. Balabane. 1996. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry.* 28: 1261 – 1263.
- Bautista C. M. A. 2001. *Indicadores de la calidad del suelo en tres cronosecuencias de Bosque Mesófilo Sierra Norte Oaxaca.* Tesis de Maestría, Colegio de Posgraduados Campus Montecillo
- Berg, B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 133, 13–22.
- Bremner J., M. and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen – Total. In: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney. *Methods of Soils Analysis (Part. 2)* American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. (Agronomy 9). pp. 595-622.





- Bohn, H.L., Neal B.L., O'Connor G.A. 1993. Química del suelo. pp. 155-171
- Boul, S. W. 1995. Sustainability of soil use. Annual Review of Ecology and Systematic 26: 25-44
- Bures S. 2008. Descomposición de la materia orgánica. Documento HTML <http://www.terralia.com/articulo.php?recordID=902#>. Fecha de consulta 25/04/08
- Cachón A., H. E., H. Nery G. y E. H. Cuanalo de la C. 1976. Los suelos del área de influencia de Chapingo. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 80 p.
- Castellanos J., Z., J. X. Uvalle, B. y A. Aguilar S. 2000 Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2da. edición. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola (INCAPA). Celaya, Guanajuato México. 226 p.
- Chantigny, M. H., Angers D. A. and P. Rochette. 2001. Fate of carbon and nitrogen from animal manure and crop residues in wet and cold soils. Soil Biology and Biochemistry. 34: 509 – 517.
- Cepeda, D. J. M. 1991. Química de suelos. Ed. Trillas. 2ª Edición. México. pp 43-63.
- Chaminade, R. 1946. Análisis Ann. Agro.2. pp. 119-132.
- Chen, Y. Senesi, N. Schnitzer, M. 1977. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios. Soil Sci. Soc. Am. Journal. 41: 352-358





- Christensen, B.T. 1996. Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pools in simulation models of carbon turnover: Revision of model structure. In Powlson D. S. P. p. 144-160.
- Curtin D. and P. M. Fraser. 2003. Soil organic matter as influenced by straw management practices and inclusion of grass and clover seed crops in cereal rotations. Australian Journals of Soil Research. 41: 95 – 106.
- Cruz, F.G., Granados, D. M.R., Castillo, G.L., Campo, J. 2008. Variación altitudinal de carbono de la biomasa microbiana del suelo y de ácidos húmicos y fúlvicos del parque nacional izta-popo. FEZ Zaragoza UNAM.
- De Brito G. J. 2004. Caracteres de la materia orgánica de algunos suelos del Estado Yaracuy. Venezuela. Agronomía tropical. 26 (4): 337-351.
- De Neve, S., G. Hofman. 2002. Quantifying soil water effects on nitrogen mineralization from soil organic matter and from fresh crop residues. Biology and Fertility Soils. 35:379-386.
- Doran, J.W., y T.B. Parkin., 1994. Defining and Assessing Soil Quality. Pp.3-22. In: J. Doran, Coleman D, Bezdicek D. y Stewart B. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment SSSA Special Publication no. 35. Wisconsin, U.S.A
- Douglas, L. K., Craig, A. D., y Susan, S.A. 2003. Soil quality: why and how? USDA-ARS Nacional Soil Tilth Laboratory. Geoderma. June vol. 114 no.3. pp. 145-156.
- Dubach, P. and Mehta, N. C. 1963. The chemistry of soil humic substances. Soil Fert. 26. pp. 293-300.





- Duchaufour, P., Bonneau M., Jacquin F., Souchier B., 1975, Manual de Edafología, Ed. Toray- masson, S.A., Barcelona. pp. 123-160.
- Duchaufour, P., Bonneau M., Jacquin F., Souchier B., 1978, Manual de Edafología, Ed. Toray- masson, S.A., Barcelona. pp. 125-126.
- Duchaufour, P y Jacquin, F. 1963. Materia orgánica y biología de los suelos: Ann. Agro. 14. pp. 885-918.
- Dos Santos, J.L.F. 2003, Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia; Estudo das Frações obtidas no processo de extração alcalina de substâncias húmicas da turfa, Porto Alegre. pp. 30.
- Espinoza, J. 2004. Claidad de la materia orgánica bajo diferentes prácticas de manejo en un suelo ácido tropical. Rev. Fac. Agron. vol.21 no.2. Caracas, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, (INIA). Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, (Ceniap), Venezuela.
- Fassbender, H. W y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos de América Latina. Ed. IICA San Jose, Costa Rica.
- Francis G. S., J. Tabley F. and M. White K. 1999. Restorative crops for the amelioration of degraded soil conditions in New Zealand. Australian Journals of Soil Research. 37: 1017 – 1034.
- Franzluebber, A. J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Soil & Tillage Research 66: 95-106.





- Gaius, R. S., Giblin A. E., Nadelhoffer, K. J., Thielert, K. K., Downs, M. R., Laundre, J. A. And rastetter, E. B. 2006. Carbon turnover in alaskan tundra soils: effects of organic matter quality, temperature, moisture and fertilizer. *Journal of ecology* 94:740 –753
- Ganuza, M, A. 2006. Caracterización de la materia orgánica del suelo de ecosistemas representativos del país Vasco y su relación con factores edáficos, climáticos y antrópicos. Tesis doctoral. Departamento de suelos CCMA (CSIC). Presentación.
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köeppen. Enriqueta García de Miranda. México, D. F. pp. 216.
- García O. F. 2004. Agricultura sustentable y materia orgánica del suelo: siembra directa, rotaciones y fertilidad.
[http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/\\$webindex/article=3262118E03256DB8006C21FD9E4440F5](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/$webindex/article=3262118E03256DB8006C21FD9E4440F5). Presentación realizada en el III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia
- González, C.S.2006. Mi perspectiva histórica sobre los compuestos humificados. Curso avanzado sobre bioquímica del suelo. Artículo ASPX. Fecha de consulta 25 de Junio de 2007.
- Gregorich, E.G, Carter, D. A, Angers, C. M., Monreal and Ellert, B.H. 1994. Towards a minimum data set to asses soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. Journal. Soil Sci.* 74:367-386.
- Gregorich E. G., F. Drury C. and A. Baldock J. 2001. Changes in soil carbon under long-term maize in monoculture and legume-based rotations. *Canadian Journal of Aoil Science.* 81: 21 – 30.





- Gillon, D., Joffre, R. and Dardenne, P. 1993. Predicting the stage of decay of decomposing leaves by near infrared reflectance spectroscopy. – Can. Journal. For. Res. 23: 2552–2559.
- Gillon, D., Joffre, R. and Ibrahima, A. 1994. Initial litter properties and decay rate: a microcosm experiment on Mediterranean species. – Can. Journal. Bot. 72: 946–954.
- Gillon, D., Houssard, C. and Joffre, R. 1999a. Using near-infrared reflectance spectroscopy to predict carbon, nitrogen and phosphorous content in heterogeneous plant material.– Oecologia 118: 173–182.
- Gillon, D., Joffre, R. and Ibrahima, A. 1999b. Can litter decomposability be predicted by near infrared reflectance spectroscopy? – Ecology 80: 175–186.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, R. G., Cline, R. F., Harris y Schuman, G. E. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. SSSA Journal, 61: 4-10.
- Kononova, M. M, y Belchikova, N. P. 1961. Pochvovedenie. 10. pp. 75-87
- Kononova, M. M. 1966. Soil organic matter. Pergamon Press, Inc., New York. pp. 544.
- Labrador, M. J. 1996. La materia orgánica en los agrosistemas. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid pp. 19-27 y 38-55.
- Leifeld, J. and Fuhrer, J. 2005. The temperature response of CO₂ production from bulk soils and soil fractions is related to soil organic matter quality. Biogeochemistry 75: 433–453





- León, A. R. 2007. Nueva Edafología. Cuarta edición; con el apoyo del H. Ayuntamiento de Xalapa de Enriquez, Ver. México. Pp. 557
- León, M. H.M. 2007 Estimación del contenido de C en suelos de bosques templados y su relación con la calidad del suelo. Tesis de licenciatura. FEZ Zaragoza UNAM.
- Manil, G. 1961. Landbouwhogeschool en de Opzoekingsstations van de Staat te Gent. 1. pp. 50-83.
- Mortvedt, J. J. Giordano, P. M. y Lindsay, W. L. 1983. Micronutrientes en agricultura, AGT editor, S.A. México, D.F. pp 87-102.
- Moscatelli, G. 2005. Informe técnico. Instituto de Suelos del INTA cautelar en Argentina Área de Investigación, Cartografía y Evaluación de Tierras <http://www.clarin.com/suplementos/rural/2005/08/13/r-01011.htm>. Fecha de consulta 21 de Febrero de 2008
- Nelson D. W. y L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney (ed.). Methods of Soils Analysis (Part. 2) American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. (Agronomy 9). pp. 539-577.
- Niemeyer, J. Y, Chen, and Bollag, J. M. 1992. Characterización of humic acids, compost, and peat by diffuse reflectance Fourier – Transform Infrared Spectroscopy. Soil Science Society of America 56: 135-140.
- Orlov, D. S. 1992. Soil chemistry. Russian translations series 92. Khimiya Pochv. Moscow Press. USA.





- Parr, J. F., Papendick, R. I., Hornick, S. B. y Meyer, R. E. 1992. Soil quality: attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. American Journal. of alternative agriculture 7: pp. 5-11
- Per-Olov, B. and Lundkvist, H. 2004. Does an admixture of betula species in picea abies stands increase organic matter quality and nitrogen release?. Journal. For. Res. Scand.19: 127-141
- Recous T. S., B. Bentz, M. Linéres, D. Chéneby and B. Nicolardot. 2000. Biochemical Quality of Crop Residues and Carbon and Nitrogen Mineralization Kinetics under Nonlimiting Nitrogen Conditions. Soil Science Society of America Journal. 64:918-926.
- Rivero, T. C. Paolini, J. 1994, Caracterización de la materia orgánica en tres suelos venezolanos, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela. http://www.redpav.avepagro.org.ve/fagro/v20_34/v203a060.html. Artículo HTML. Fecha de consulta 7 de Mayo de 2007.
- Rodríguez, S. F. 1999. Fertilizantes nutrición vegetal. AGT Editor, S. A. México. pp. 33-157
- Rodríguez, S. J. 1993. La fertilidad de los cultivos: Un método racional. Colección en agricultura. Facultad de agronomía. Santiago. Chile. pp. 57-65
- Sá J.C.M., C. Cerri, W. Dick, R. Lal, S. Venske Filho, M. Piccolo, B. Feigl. 2001. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. Soil Sci. Soc. Am. Journal. 65:1486-1499.
- SAS. 1999. SAS/STAT User's Guide. Version 8 ed. SAS Inst. Inc. Cary NC, USA. 3848 p.





- Sánchez, G.A. 2008. Cambios en la calidad de la material orgánica disuelta en suelos regados con agua residual. Tesis de maestría. Geología ambiental. UNAM
- Santander, G. M. 2004. Caracterización de materia orgánica por espectroscopia de infrarrojo (FT-IR) y su relación con nitrógeno y fósforo en suelo post-incendio de un bosque de oyamel. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza UNAM.
- Schnitzer , M. 1990. Selected methods for the characterization of soil humic substances. En: P. McCarthy y cols. (Ed.): Humic substances in soil and crop sciences. ASA & SSSA. Madison: pp. 65-89.
- Sojka, R. E y Upchurch, D. R. 1999. Reservations regarding the soil quality concept. Soil science society of America Journal. 63: 1039-1054.
- Stevenson, F. J. Humus chemistry. Genesis, composition, reactions. 1994. 2nd ed. New Cork, USA: John Wiley & Sons INC. 1994. pp 496.
- Studdert G., y H. Echeverría 2000. Rotaciones mixtas, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. En: Jornada de actualizacion técnica para profesionales “Fertilidad 2002”.INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires 52 p.
- Wild, A., Urbano, T. P., Rojo, H. C. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid España.pp. 165.
- Williams P. H., S. Rowarth J. and J. Tregurtha R. 2000. Recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer by perennial ryegrass seed crop and a subsequent wheat crop. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 56:117 – 123.





- Whitehead, D.C. 1995. Grassland Nitrogen. CAB International, Oxon, United Kingdom. pp. 397.
- Young R. A. 1991. Introducción a las ciencias forestales. Ed. Noriega editores México
- Zagal. E, Córdova, C. 2005. Indicadores de calidad de la materia orgánica del suelo en un andisol cultivado. Agricultura Técnica (Chile) 65(1):186-197 Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chile.
- Zecaida R. Ma.S. 2006. Reservorios de nitrógeno en un suelo con rotación de cultivos forrajeros. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México.






8. ANEXO A. Técnicas de análisis de suelos

Extracción de ácidos húmicos y fúlvicos

(Celli *et al.*, 1997, citado por Santander, 2004)

Reactivos:

-  Solución de Pirofosfato de sodio ($\text{Na}_4\text{O}_7\text{P}_2$) 0.1 M.
-  Hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M.
-  Ácido Clorhídrico (HCl) 6 M.

Procedimiento:

- Secar la muestra de suelo en la estufa a una temperatura de 30 °C, y tamizar con una luz de malla de 2 mm.
- Pesar 10 g de muestra y transferir a un tubo con cierre hermético, adicionar 35 mL de la solución 1:1 de Hidróxido de Sodio y Pirofosfato de sodio 0.1 M, agitar por una hora y dejar a temperatura ambiente durante 24 horas bajo atmósfera de nitrógeno.
- Centrifugar la muestra por 30 minutos a 3000 rpm, por 30 minutos, decantar el sobrenadante (ácidos húmicos y ácidos fúlvicos) y acidificarlo con la solución de ácido clorhídrico 6 M hasta pH 1. dejar reposar por 12 horas a temperatura ambiente.
- Centrifugar por 30 minutos a 3000 rpm, el sobrenadante (ácidos fúlvicos), se coloca en cápsula de porcelana y se seca en la estufa a una temperatura de 30 a 35 °C.
- El precipitado corresponde a los ácidos húmicos, los cuales se disuelven nuevamente con 25 mL de solución de pirofosfato de sodio e hidróxido de sodio (1:1), agitar por 4 horas en atmósfera de nitrógeno.





- Acidificar nuevamente con solución de ácido clorhídrico 6 M hasta pH 1, permitiendo la coagulación de los ácidos húmicos.
- Centrifugar nuevamente por 30 minutos a 3000 rpm, eliminando el sobrenadante y lavando el precipitado con agua destilada (de 4 a 5 lavados) hasta que el contenido de cenizas sea menor al 4%.
- Secar los ácidos húmicos en la estufa a una temperatura de 30 a 35 °C.
- Almacenar en recipientes de cierre hermético.

Anexo B. Caracterización por espectroscopia de IR.

Instrumento. Espectrofotómetro en Infrarrojo con transformadas de Fourier FTIR Nexus Nicolet, acoplado a un microscopio. Los espectros obtenidos se obtuvieron en absorción y la posición de las señales se da en número de onda (cm^{-1}).

Preparación de la muestra para análisis IR. Pulverizar en un mortero de ágata 5 mg de la muestra con 100 mg de bromuro de potasio y triturar hasta obtener un polvo fino, colocar la mezcla en una matriz de acero inoxidable y comprimir en una prensa hidráulica. Para obtener una pastilla de KBr, la cual se analiza en el espectrofotómetro IR.





Anexo C. Determinación de la relación E4/E6 metodología descrita por Stevenson (1994) (citado por Dos Santos, 2003)

- ♦ Pesar dos miligramos de ácidos húmicos y cuatro miligramos de ácidos fúlvicos
- ♦ Adicionar 10 mL de NaHCO_3 0.05 mol a cada muestra y homogeneizar, las soluciones de los ácidos húmicos y fúlvicos
- ♦ Filtrar para eliminar partículas insolubles.
- ♦ Las soluciones de ácidos húmicos debido a su fuerte coloración oscura, deberán diluirse 10 veces transfiriendo un mL de la solución a un matraz aforado de 10 mL completando el volumen con una solución de NaHCO_3 0.05 mol.
- ♦ Medir la absorbancia de las soluciones a una longitud de onda de 465 nm (E4) y 665 nm (E6) en un espectrofotómetro de UV/Vis.
- ♦ Calcular la relación dividiendo el valor de absorbancia medida en longitud de onda de 465 nm (E4) entre el valor dado en 665 nm (E6).

Anexo C'. Modificación a la técnica de Stevenson (1994)

Se procedió a realizar la técnica original de Stevenson para la determinación del grado de condensación de los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. Los cuáles se muestran insolubles bajo NaHCO_3 0.05 mol, por lo que se procedió a realizar ensayos con diferentes mezclas de soluciones a diferente concentración.

Se preparó la solución de bicarbonato de sodio 0.05 mol; a cada muestra se le agregó 10 ml de esta solución (en este paso las fracciones húmicas debieron ponerse en suspensión)





Pero debido a la propiedad refractante de los ácidos (debido probablemente al manejo que se le ha dado a los campos experimentales de Chapingo) estos se mantuvieron insolubles al reactivo alcalino.

Por lo tanto se procedieron a hacer pruebas de solubilidad a diferente concentración:

- ❖ Pirofosfato de Sodio 0.1 M e hidróxido de Sodio 0.1M
- ❖ Pirofosfato de Sodio 0.1M y bicarbonato de sodio 0.05M
- ❖ Bicarbonato de Sodio 0.05 mol

Estas soluciones dieron lecturas muy bajas por lo que se procedió a aumentar la cantidad de muestra al triple del peso (6mg), la cuál se maceró antes de pesar.

Para la segunda prueba se maceraron los ácidos húmicos y fúlvicos, agregándoles una solución de Pirofosfato de Sodio + hidróxido de Sodio 0.1M y Pirofosfato de Sodio 0.1M + bicarbonato de Sodio 0.005M , para ayudar a la solubilización se pusieron en el agitador de vaivén a 160 rpm durante una hora.

Pasado el tiempo se filtraron con papel filtro de poro grueso (para eliminar las partículas insolubles)

Se procedió a realizar las lecturas en el Espectrofotómetro de luz visible a 465 nm y 665 nm.







Obteniéndose, resultados de lecturas más uniformes con la solución de Pirofosfato de Sodio + Bicarbonato de sodio por lo que esta mezcla es la ideal para leer las muestras





Anexo D. Determinación de Materia Orgánica, método de Walkley & Black (Jackson, 1964).

Reactivos:

-  Dicromato de potasio 1.0 N
-  Sulfato ferroso 0.5 N
-  Indicador de difenilamina
-  Ácido sulfúrico concentrado
-  Ácido fosfórico concentrado
-  Fluoruro de sodio

Procedimiento:

- ♦ Se pesan 0.5 g de suelo (en este caso se pesaron 0.1 g de suelo por alto contenido de MOS) tamizado en una malla de 2 mm, se colocan en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, se añaden 5 mL de dicromato de potasio 1N y se agita.
- ♦ Se añaden 10 mL de ácido sulfúrico concentrado y se agita durante 1 minuto, se deja reposar por 30 minutos o hasta que se haya enfriado.
- ♦ Se añaden 100 mL de agua destilada, se agita y se deja enfriar.
- ♦ Se agregan 5 mL de ácido fosfórico concentrado, 0.05 g de fluoruro de sodio y 10 a 15 gotas de indicador de difenilamina.
- ♦ Se titula con sulfato ferroso 0.5 N.
- ♦ Para hacer la valoración de la solución de sulfato ferroso, se corre una prueba en blanco (todos los reactivos sin suelo) y se obtiene el valor de B de la siguiente ecuación. Con el empleo de la siguiente fórmula no es necesario calcular específicamente la normalidad.

Cálculos

$$\% \text{ M.O.} = 10 (1 - M/B) \times 1.34$$

M = mL de sulfato ferroso gastados en la titulación

B = mL de sulfato ferroso gastados en el blanco

El factor 1.34 se deduce de la siguiente forma:

$$(1.0 \text{ N}) \times 12/4000 \times 1.72/0.77 \times 100/0.5 = 1.34$$

$$(1.0 \text{ N}) \times 12/4000 \times 1.72/0.77 \times 100/0.1 = 6.70 \text{ (en este caso)}$$





1.0 = normalidad del $K_2Cr_2O_7$

12/4000 = peso miliequivalentes del carbono

1.72 = factor de transformación de carbono en materia orgánica (MO)

0.77 = factor de recuperación de 77% determinado por Walkley

0.5 = peso de muestra (en este caso 0.1g)

- **ANEXO E.** Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias de materia orgánica.

•

• ----- PROF=1 -----

The MIXED Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
BLO	3	1 2 3
TRA	3	MA PA PP
MTRO	3	1 2 3
PLOT	9	1 2 3 4 5 6 7 8 9

REML Estimation Iteration History

Iteration	Evaluations	Objective	Criterion
0	1	-18.85958930	
1	2	-25.15657499	0.01423391
2	1	-25.36687217	0.00163553
3	1	-25.38938875	0.00003376
4	1	-25.38982363	0.00000002
5	1	-25.38982384	0.00000000

Convergence criteria met.

Covariance Parameter Estimates (REML)

Cov Parm	Group	Estimate	Std Error	Z	Pr > Z
DIAG	MTRO 1	0.01611807	0.00893146	1.80	0.0711
DIAG	MTRO 2	0.12516302	0.06748746	1.85	0.0637
DIAG	MTRO 3	0.08036053	0.04928345	1.63	0.1030

Model Fitting Information for MO

Description	Value
Observations	27.0000
Res Log Likelihood	-4.7649
Akaike's Information Criterion	-7.7649
Schwarz's Bayesian Criterion	-9.1816
-2 Res Log Likelihood	9.5298
Null Model LRT Chi-Square	6.5302
Null Model LRT DF	2.0000
Null Model LRT P-Value	0.0382





----- PROF=1 -----

Tests of Fixed Effects

Source	NDF	DDF	Type III F	Pr > F
BLO	2	19	5.57	0.0124
TRA (MTRO)	5	19	0.54	0.7432

Least Squares Means

Effect	TRA	MTRO	LSMEAN	Std Error	DF	t	Pr > t
TRA (MTRO)	PP	1	2.30055556	0.04231898	19	54.36	0.0001
TRA (MTRO)	MA	2	2.35566667	0.20425721	19	11.53	0.0001
TRA (MTRO)	PP	2	2.31100000	0.14443166	19	16.00	0.0001
TRA (MTRO)	MA	3	2.27733333	0.16366686	19	13.91	0.0001
TRA (MTRO)	PA	3	2.50966667	0.16366686	19	15.33	0.0001
TRA (MTRO)	PP	3	2.48766667	0.16366686	19	15.20	0.0001

Differences of Least Squares Means

Effect	TRA	MTRO	_TRA	_MTRO	Difference	Std Error	DF	t	Pr > t
TRA (MTRO)	PP	1	A	2	-0.05511111	0.20859507	19	-0.26	0.7945
TRA (MTRO)	PP	1	PP	2	-0.01044444	0.15050382	19	-0.07	0.9454
TRA (MTRO)	PP	1	MA	3	0.02322222	0.16904951	19	0.14	0.8922
TRA (MTRO)	PP	1	PA	3	-0.20911111	0.16904951	19	-1.24	0.2312
TRA (MTRO)	PP	1	PP	3	-0.18711111	0.16904951	19	-1.11	0.2822
TRA (MTRO)	MA	2	PP	2	0.04466667	0.25016297	19	0.18	0.8602
TRA (MTRO)	MA	2	MA	3	0.07833333	0.26174004	19	0.30	0.7680
TRA (MTRO)	MA	2	PA	3	-0.15400000	0.26174004	19	-0.59	0.5632
TRA (MTRO)	MA	2	P	3	-0.13200000	0.26174004	19	-0.50	0.6198
TRA (MTRO)	PP	2	MA	3	0.03366667	0.21828272	19	0.15	0.8791
TRA (MTRO)	PP	2	PA	3	-0.19866667	0.21828272	19	-0.91	0.3742
TRA (MTRO)	PP	2	PP	3	-0.17666667	0.21828272	19	-0.81	0.4283
TRA (MTRO)	MA	3	PA	3	-0.23233333	0.23145990	19	-1.00	0.3281
TRA (MTRO)	MA	3	PP	3	-0.21033333	0.23145990	19	-0.91	0.3749
TRA (MTRO)	PA	3	PP	3	0.02200000	0.23145990	19	0.10	0.9253

Tests of Effect Slices

Effect	MTRO	NDF	DDF	F	Pr > F
TRA (MTRO)	1	0	.	.	.
TRA (MTRO)	2	1	19	0.03	0.8602
TRA (MTRO)	3	2	19	0.61	0.5515

----- PROF=2 -----

The MIXED Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
BLO	3	1 2 3
TRA	3	MA PA PP
MTRO	3	1 2 3
PLOT	9	1 2 3 4 5 6 7 8 9





REML Estimation Iteration History

Iteration	Evaluations	Objective	Criterion
0	1	-29.44491362	
1	2	-31.75699950	0.00034180
2	1	-31.76259084	0.00000076
3	1	-31.76260297	0.00000000

Convergence criteria met.

Covariance Parameter Estimates (REML)

Cov Parm	Group	Estimate	Std Error	Z	Pr >
DIAG	MTRO 1	0.04257324	0.02223263	1.91	0.0555
DIAG	MTRO 2	0.01692378	0.01035322	1.63	0.1021
DIAG	MTRO 3	0.07468024	0.04754657	1.57	0.1163

Model Fitting Information for MO

Description	Value
Observations	27.0000
Res Log Likelihood	-1.5785
Akaike's Information Criterion	-4.5785
Schwarz's Bayesian Criterion	-5.9952
-2 Res Log Likelihood	3.1571
Null Model LRT Chi-Square	2.3177
Null Model LRT DF	2.0000
Null Model LRT P-Value	0.3138

Tests of Fixed Effects

Source	NDF	DDF	Type III F	Pr > F
BLO	2	19	9.95	0.0011

Tests of Fixed Effects

Source	NDF	DDF	Type III F	Pr > F
TRA (MTRO)	5	19	3.27	0.0269

Least Squares Means

Effect	TRA	MTRO	LSMEAN	Std Error	DF	t	Pr > t
TRA (MTRO)	PP	1	1.52622222	0.06877761	19	22.19	0.0001
TRA (MTRO)	MA	2	1.28866667	0.07510832	19	17.16	0.0001
TRA (MTRO)	PP	2	1.28883333	0.05310960	19	24.27	0.0001
TRA (MTRO)	MA	3	1.57000000	0.15777647	19	9.95	0.0001
TRA (MTRO)	PA	3	1.71366667	0.15777647	19	10.86	0.0001
TRA (MTRO)	PP	3	1.58100000	0.15777647	19	10.02	0.0001

Differences of Least Squares Means

Effect	TRA	MTRO	_TRA	_MTRO	Difference	Std Error	DF	t	Pr > t
--------	-----	------	------	-------	------------	-----------	----	---	---------





TRA (MTRO)	PP	1	MA	2	0.23755556	0.10184115	19	2.33	0.0308
TRA (MTRO)	PP	1	PP	2	0.23738889	0.08689643	19	2.73	0.0132
TRA (MTRO)	PP	1	MA	3	-0.04377778	0.17211558	19	-0.25	0.8020
TRA (MTRO)	PP	1	PA	3	-0.18744444	0.17211558	19	-1.09	0.2897
TRA (MTRO)	PP	1	PP	3	-0.05477778	0.17211558	19	-0.32	0.7538
TRA (MTRO)	MA	2	PP	2	-0.00016667	0.09198853	19	-0.00	0.9986
TRA (MTRO)	MA	2	MA	3	-0.28133333	0.17474174	19	-1.61	0.1239
TRA (MTRO)	MA	2	PA	3	-0.42500000	0.17474174	19	-2.43	0.0251
TRA (MTRO)	MA	2	PP	3	-0.29233333	0.17474174	19	-1.67	0.1107
TRA (MTRO)	PP	2	MA	3	-0.28116667	0.16647536	19	-1.69	0.1076
TRA (MTRO)	PP	2	PA	3	-0.42483333	0.16647536	19	-2.55	0.0195
TRA (MTRO)	PP	2	PP	3	-0.29216667	0.16647536	19	-1.76	0.0954
TRA (MTRO)	MA	3	PA	3	-0.14366667	0.22312963	19	-0.64	0.5274
TRA (MTRO)	MA	3	PP	3	-0.01100000	0.22312963	19	-0.05	0.9612
TRA (MTRO)	PA	3	PP	3	0.13266667	0.22312963	19	0.59	0.5591

Tests of Effect Slices

Effect	MTRO	NDF	DDF	F	Pr > F
TRA (MTRO)	1	0	.	.	.
TRA (MTRO)	2	1	19	0.00	0.9986
TRA (MTRO)	3	2	19	0.26	0.7761

• ANEXO F. Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias de ácidos fúlvicos

----- PROF=1 -----

Procedimiento Mixed

Model Information

Conj. datos	WORK.TMP
Variable dependiente	PAF
Estructura de covarianza	Variance Components
Efecto de grupo	MTRO
Método de estimación	REML
Método de varianza del residual	Nada
Método SE de efectos fijos	Basado en el modelo
Método de grados de libertad	Between-within

Información de nivel de clase

Class	Levels	Values
BLO	3	1 2 3
tra	3	MA PA PP
MTRO	3	1 2 3
plot	9	1 2 3 4 5 6 7 8 9

Dimensions

Parámetros de covarianza	3
Columnas en X	10
Columnas en Z	0
Asuntos	27
Obs máx por asunto	1
Observaciones utilizadas	27
Observaciones no utilizad	0
Observaciones totales	27

Iteration History

Iteration	Evaluations	-2 Res Log Like	Criterion
-----------	-------------	-----------------	-----------





0	1	99.44308362	
1	2	90.41256239	0.00111760
2	1	90.37806248	0.00004295
3	1	90.37683917	0.00000008
4	1	90.37683705	0.00000000

----- PROF=1 -----

Procedimiento Mixed

Se ha cumplido el criterio de convergencia.

Estimadores de parámetro de covarianza

Cov Parm	Group	Estimador	Error estándar	Z Value	Pr Z
Residual	MTRO 1	6.7932	3.4792	1.95	0.0254
Residual	MTRO 2	0.5599	0.3516	1.59	0.0557
Residual	MTRO 3	10.8334	6.3532	1.71	0.0441

Fit Statistics

Verosimilitud -2 Res Log	90.4
AIC (mejor más pequeño)	96.4
AICC (mejor más pequeño)	98.0
BIC (mejor más pequeño)	100.3

Test del ratio de verosimilitud del modelo nulo

DF	Chi-Square	Pr > ChiSq
2	9.07	0.0107

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
BLO	2	19	11.87	0.0005
tra(MTRO)	5	19	2.03	0.1201

Least Squares Means

Effect	tra	MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	30.8156	0.8688	19	35.47	<.0001
tra(MTRO)	MA	2	32.5567	0.4320	19	75.36	<.0001
tra(MTRO)	PP	2	33.2217	0.3055	19	108.75	<.0001
tra(MTRO)	MA	3	33.5567	1.9003	19	17.66	<.0001
tra(MTRO)	PA	3	33.6667	1.9003	19	17.72	<.0001
tra(MTRO)	PP	3	29.8867	1.9003	19	15.73	<.0001

----- PROF=1 -----

Procedimiento Mixed

Differences of Least Squares Means

Effect	tra	MTRO	_tra	_MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	MA	2	-1.7411	0.9703	19	-1.79	0.0887
tra(MTRO)	PP	1	PP	2	-2.4061	0.9209	19	-2.61	0.0171
tra(MTRO)	PP	1	MA	3	-2.7411	2.0895	19	-1.31	0.2052
tra(MTRO)	PP	1	PA	3	-2.8511	2.0895	19	-1.36	0.1884
tra(MTRO)	PP	1	PP	3	0.9289	2.0895	19	0.44	0.6617
tra(MTRO)	MA	2	PP	2	-0.6650	0.5291	19	-1.26	0.2241
tra(MTRO)	MA	2	MA	3	-1.0000	1.9488	19	-0.51	0.6138
tra(MTRO)	MA	2	PA	3	-1.1100	1.9488	19	-0.57	0.5756
tra(MTRO)	MA	2	PP	3	2.6700	1.9488	19	1.37	0.1866
tra(MTRO)	PP	2	MA	3	-0.3350	1.9247	19	-0.17	0.8637
tra(MTRO)	PP	2	PA	3	-0.4450	1.9247	19	-0.23	0.8196
tra(MTRO)	PP	2	PP	3	3.3350	1.9247	19	1.73	0.0993
tra(MTRO)	MA	3	PA	3	-0.1100	2.6874	19	-0.04	0.9678
tra(MTRO)	MA	3	PP	3	3.6700	2.6874	19	1.37	0.1880





tra(MTRO) PA 3 PP 3 3.7800 2.6874 19 1.41 0.1757

Tests of Effect Slices

Effect	MTRO	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
tra(MTRO)	1	0	.	.	.
tra(MTRO)	2	1	19	1.58	0.2241
tra(MTRO)	3	2	19	1.28	0.3005

----- PROF=2 -----

Procedimiento Mixed

Model Information

Conj. datos	WORK.TMP
Variable dependiente	PAF
Estructura de covarianza	Variance Components
Efecto de grupo	MTRO
Método de estimación	REML
Método de varianza del residual	Nada
Método SE de efectos fijos	Basado en el modelo
Método de grados de libertad	Between-within

Información de nivel de clase

Class	Levels	Values
BLO	3	1 2 3
tra	3	MA PA PP
MTRO	3	1 2 3
plot	9	1 2 3 4 5 6 7 8 9

Dimensions

Parámetros de covarianza	3
Columnas en X	10
Columnas en Z	0
Asuntos	27
Obs máx por asunto	1
Observaciones utilizadas	27
Observaciones no utilizad	0
observaciones totales	27

Iteration History

Iteration	Evaluations	-2 Res Log Like	Criterion
0	1	67.47655387	
1	4	62.69378585	0.00223717
2	1	62.66016117	0.00005048
3	1	62.65944910	0.00000003
4	1	62.65944863	0.00000000

----- PROF=2 -----

Procedimiento Mixed

Se ha cumplido el criterio de convergencia.

Estimadores de parámetro de covarianza

Cov Parm	Group	Estimador	Error estándar	Z value	Pr > Z
Residual	MTRO 1	2.2669	1.1894	1.91	0.0283
Residual	MTRO 2	0.5912	0.3329	1.78	0.0379
Residual	MTRO 3	0.3139	0.2032	1.54	0.0613

Fit Statistics

Verosimilitud -2 Res Log 62.7





AIC (mejor más pequeño) 68.7
AICC (mejor más pequeño) 70.3
BIC (mejor más pequeño) 72.5

Test del ratio de verosimilitud
del modelo nulo

DF	Chi-Square	Pr > ChiSq
2	4.82	0.0899

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
BLO	2	19	12.29	0.0004
tra(MTRO)	5	19	3.04	0.0350

Least Squares Means

Effect	tra	MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	34.0733	0.5019	19	67.89	<.0001
tra(MTRO)	MA	2	32.8900	0.4439	19	74.09	<.0001
tra(MTRO)	PP	2	33.1117	0.3139	19	105.49	<.0001
tra(MTRO)	MA	3	34.3367	0.3235	19	106.16	<.0001
tra(MTRO)	PA	3	34.3333	0.3235	19	106.15	<.0001
tra(MTRO)	PP	3	33.5567	0.3235	19	103.74	<.0001

----- PROF=2 -----

Procedimiento Mixed

Differences of Least Squares Means

Effect	tra	MTRO	_tra	_MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	MA	2	1.1833	0.6700	19	1.77	0.0934
tra(MTRO)	PP	1	PP	2	0.9617	0.5920	19	1.62	0.1207
tra(MTRO)	PP	1	MA	3	-0.2633	0.5971	19	-0.44	0.6642
tra(MTRO)	PP	1	PA	3	-0.2600	0.5971	19	-0.44	0.6681
tra(MTRO)	PP	1	PP	3	0.5167	0.5971	19	0.87	0.3977
tra(MTRO)	MA	2	PP	2	-0.2217	0.5437	19	-0.41	0.6880
tra(MTRO)	MA	2	MA	3	-1.4467	0.5493	19	-2.63	0.0164
tra(MTRO)	MA	2	PA	3	-1.4433	0.5493	19	-2.63	0.0166
tra(MTRO)	MA	2	PP	3	-0.6667	0.5493	19	-1.21	0.2397
tra(MTRO)	PP	2	MA	3	-1.2250	0.4507	19	-2.72	0.0137
tra(MTRO)	PP	2	PA	3	-1.2217	0.4507	19	-2.71	0.0139
tra(MTRO)	PP	2	PP	3	-0.4450	0.4507	19	-0.99	0.3359
tra(MTRO)	MA	3	PA	3	0.003333	0.4574	19	0.01	0.9943
tra(MTRO)	MA	3	PP	3	0.7800	0.4574	19	1.71	0.1045
tra(MTRO)	PA	3	PP	3	0.7767	0.4574	19	1.70	0.1058

Tests of Effect slices

Effect	MTRO	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
tra(MTRO)	1	0	.	.	.
tra(MTRO)	2	1	19	0.17	0.6880
tra(MTRO)	3	2	19	1.93	0.1725





• ANEXO G. Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias de ácidos húmicos

----- PROF=1 -----

Procedimiento Mixed

Model Information

Conj. datos	WORK.TMP
Variable dependiente	PAH
Estructura de covarianza	Variance Components
Efecto de grupo	MTRO
Método de estimación	REML
Método de varianza del residual	Nada
Método SE de efectos fijos	Basado en el modelo
Método de grados de libertad	Between-within

Información de nivel de clase

Class	Levels	Values
BLO	3	1 2 3
tra	3	MA PA PP
MTRO	3	1 2 3
plot	9	1 2 3 4 5 6 7 8 9

Dimensions

Parámetros de covarianza	3
Columnas en X	10
Columnas en Z	0
Asuntos	27
Obs máx por asunto	1
observaciones utilizadas	27
observaciones no utilizad	0
observaciones totales	27

Iteration History

Iteration	Evaluations	-2 Res Log Like	Criterion
0	1	123.30552959	
1	4	115.84919837	0.00041143
2	1	115.83263314	0.00000350
3	1	115.83249089	0.00000000

----- PROF=1 -----

Procedimiento Mixed

Se ha cumplido el criterio de convergencia.

Estimadores de parámetro de covarianza

Cov Parm	Group	Estimador	Error estándar	Z Value	Pr Z
Residual	MTRO 1	4.7100	2.7581	1.71	0.0438
Residual	MTRO 2	13.9553	7.8798	1.77	0.0383
Residual	MTRO 3	54.3612	32.2904	1.68	0.0461

Fit Statistics

Verosimilitud	-2 Res Log	115.8
AIC (mejor más pequeño)		121.8
AICC (mejor más pequeño)		123.4
BIC (mejor más pequeño)		125.7

Test del ratio de verosimilitud del modelo nulo

DF	Chi-Square	Pr > ChiSq
----	------------	------------





2 7.47 0.0238

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
BLO	2	19	1.58	0.2311
tra(MTRO)	5	19	42.26	<.0001

Least Squares Means

Effect	tra	MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	8.4456	0.7234	19	11.67	<.0001
tra(MTRO)	MA	2	26.6700	2.1568	19	12.37	<.0001
tra(MTRO)	PP	2	26.8050	1.5251	19	17.58	<.0001
tra(MTRO)	MA	3	34.6633	4.2568	19	8.14	<.0001
tra(MTRO)	PA	3	23.5567	4.2568	19	5.53	<.0001
tra(MTRO)	PP	3	32.4433	4.2568	19	7.62	<.0001

----- PROF=1 -----

Procedimiento Mixed

Differences of Least Squares Means

Effect	tra	MTRO	_tra	_MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	MA	2	-18.2244	2.2749	19	-8.01	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	PP	2	-18.3594	1.6880	19	-10.88	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	MA	3	-26.2178	4.3178	19	-6.07	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	PA	3	-15.1111	4.3178	19	-3.50	0.0024
tra(MTRO)	PP	1	PP	3	-23.9978	4.3178	19	-5.56	<.0001
tra(MTRO)	MA	2	PP	2	-0.1350	2.6415	19	-0.05	0.9598
tra(MTRO)	MA	2	MA	3	-7.9933	4.7720	19	-1.68	0.1103
tra(MTRO)	MA	2	PA	3	3.1133	4.7720	19	0.65	0.5219
tra(MTRO)	MA	2	PP	3	-5.7733	4.7720	19	-1.21	0.2412
tra(MTRO)	PP	2	MA	3	-7.8583	4.5218	19	-1.74	0.0984
tra(MTRO)	PP	2	PA	3	3.2483	4.5218	19	0.72	0.4813
tra(MTRO)	PP	2	PP	3	-5.6383	4.5218	19	-1.25	0.2276
tra(MTRO)	MA	3	PA	3	11.1067	6.0200	19	1.84	0.0807
tra(MTRO)	MA	3	PP	3	2.2200	6.0200	19	0.37	0.7164
tra(MTRO)	PA	3	PP	3	-8.8867	6.0200	19	-1.48	0.1563

Tests of Effect slices

Effect	MTRO	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
tra(MTRO)	1	0	.	.	.
tra(MTRO)	2	1	19	0.00	0.9598
tra(MTRO)	3	2	19	1.91	0.1760

----- PROF=2 -----

Procedimiento Mixed

Model Information

Conj. datos	WORK.TMP
Variable dependiente	PAH
Estructura de covarianza	Variance Components
Efecto de grupo	MTRO
Método de estimación	REML
Método de varianza del residual	Nada
Método SE de efectos fijos	Basado en el modelo
Método de grados de libertad	Between-within

Información de nivel de clase

Class	Levels	Values
-------	--------	--------





```

BLO          3    1 2 3
tra          3    MA PA PP
MTRO         3    1 2 3
plot         9    1 2 3 4 5 6 7 8 9
  
```

Dimensions

```

Parámetros de covarianza      3
Columnas en X                  10
Columnas en Z                   0
Asuntos                         27
Obs máx por asunto             1
Observaciones utilizadas        27
observaciones no utilizad      0
Observaciones totales          27
  
```

Iteration History

Iteration	Evaluations	-2 Res Log Like	Criterion
0	1	146.75328026	
1	2	136.58740757	0.00315187
2	1	136.40539653	0.00020136
3	1	136.39464461	0.00000156
4	1	136.39456498	0.00000000

----- PROF=2 -----

Procedimiento Mixed

Se ha cumplido el criterio de convergencia.

Estimadores de parámetro de covarianza

Cov Parm	Group	Estimador	Error estándar	Z Value	Pr Z
Residual	MTRO 1	9.9325	5.4900	1.81	0.0352
Residual	MTRO 2	171.07	94.5547	1.81	0.0352
Residual	MTRO 3	44.1436	27.5492	1.60	0.0545

Fit Statistics

```

Verosimilitud -2 Res Log      136.4
AIC (mejor más pequeño)      142.4
AICC (mejor más pequeño)     144.0
BIC (mejor más pequeño)      146.3
  
```

Test del ratio de verosimilitud del modelo nulo

DF	Chi-Square	Pr > ChiSq
2	10.36	0.0056

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
BLO	2	19	0.52	0.6021
tra(MTRO)	5	19	38.92	<.0001

Least Squares Means

Effect	tra	MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	8.1478	1.0505	19	7.76	<.0001
tra(MTRO)	MA	2	55.2233	7.5514	19	7.31	<.0001
tra(MTRO)	PP	2	61.4983	5.3396	19	11.52	<.0001
tra(MTRO)	MA	3	30.2233	3.8360	19	7.88	<.0001
tra(MTRO)	PA	3	31.4433	3.8360	19	8.20	<.0001
tra(MTRO)	PP	3	29.4433	3.8360	19	7.68	<.0001

----- PROF=2 -----

Procedimiento Mixed





Differences of Least Squares Means

Effect	tra	MTRO	_tra	_MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	MA	2	-47.0756	7.6241	19	-6.17	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	PP	2	-53.3506	5.4420	19	-9.80	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	MA	3	-22.0756	3.9772	19	-5.55	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	PA	3	-23.2956	3.9772	19	-5.86	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	PP	3	-21.2956	3.9772	19	-5.35	<.0001
tra(MTRO)	MA	2	PP	2	-6.2750	9.2485	19	-0.68	0.5056
tra(MTRO)	MA	2	MA	3	25.0000	8.4698	19	2.95	0.0082
tra(MTRO)	MA	2	PA	3	23.7800	8.4698	19	2.81	0.0112
tra(MTRO)	MA	2	PP	3	25.7800	8.4698	19	3.04	0.0067
tra(MTRO)	PP	2	MA	3	31.2750	6.5747	19	4.76	0.0001
tra(MTRO)	PP	2	PA	3	30.0550	6.5747	19	4.57	0.0002
tra(MTRO)	PP	2	PP	3	32.0550	6.5747	19	4.88	0.0001
tra(MTRO)	MA	3	PA	3	-1.2200	5.4249	19	-0.22	0.8245
tra(MTRO)	MA	3	PP	3	0.7800	5.4249	19	0.14	0.8872
tra(MTRO)	PA	3	PP	3	2.0000	5.4249	19	0.37	0.7164

Tests of Effect slices

Effect	MTRO	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
tra(MTRO)	1	0	.	.	.
tra(MTRO)	2	1	19	0.46	0.5056
tra(MTRO)	3	2	19	0.07	0.9335

ANEXO H. Probabilidad de las diferencias en las comparaciones de medias de la suma de los contenidos de ácidos húmicos y fúlvicos

----- PROF=1 -----

Procedimiento Mixed

Model Information

Conj. datos WORK.TMP
 Variable dependiente PAHAF
 Estructura de covarianza Variance Components
 Efecto de grupo MTRO
 Método de estimación REML
 Método de varianza Nada
 del residual
 Método SE de Basado en el modelo
 efectos fijos
 Método de grados de libertad Between-within

Información de nivel de clase

Class	Levels	Values
BLO	3	1 2 3
tra	3	MA PA PP
MTRO	3	1 2 3
plot	9	1 2 3 4 5 6 7 8 9

Dimensions

Parámetros de covarianza	3
Columnas en X	10
Columnas en Z	0
Asuntos	27
Obs máx por asunto	1
Observaciones utilizadas	27
Observaciones no utilizad	0
Observaciones totales	27





Iteration History

Iteration	Evaluations	-2 Res Log Like	Criterion
0	1	130.91111238	
1	4	125.30365653	0.00084785
2	1	125.26211935	0.00002021
3	1	125.26118871	0.00000002
4	1	125.26118788	0.00000000

----- PROF=1 -----

Procedimiento Mixed

Se ha cumplido el criterio de convergencia.

Estimadores de parámetro de covarianza

Cov Parm	Group	Estimador	Error estándar	Z Value	Pr Z
Residual	MTRO 1	17.7076	9.5265	1.86	0.0315
Residual	MTRO 2	10.5386	5.9691	1.77	0.0387
Residual	MTRO 3	76.0949	46.1419	1.65	0.0496

Fit Statistics

Verosimilitud	-2 Res Log	125.3
AIC (mejor más pequeño)		131.3
AICC (mejor más pequeño)		132.9
BIC (mejor más pequeño)		135.1

Test del ratio de verosimilitud del modelo nulo

DF	Chi-Square	Pr > ChiSq
2	5.65	0.0593

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
BLO	2	19	0.75	0.4859
tra(MTRO)	5	19	29.67	<.0001

Least Squares Means

Effect	tra	MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	39.2589	1.4027	19	27.99	<.0001
tra(MTRO)	MA	2	59.2233	1.8743	19	31.60	<.0001
tra(MTRO)	PP	2	60.0267	1.3253	19	45.29	<.0001
tra(MTRO)	MA	3	68.2200	5.0364	19	13.55	<.0001
tra(MTRO)	PA	3	57.2200	5.0364	19	11.36	<.0001
tra(MTRO)	PP	3	62.3333	5.0364	19	12.38	<.0001

----- PROF=1 -----

Procedimiento Mixed

Differences of Least Squares Means

Effect	tra	MTRO	_tra	_MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	MA	2	-19.9644	2.3410	19	-8.53	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	PP	2	-20.7678	1.9298	19	-10.76	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	MA	3	-28.9611	5.2280	19	-5.54	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	PA	3	-17.9611	5.2280	19	-3.44	0.0028
tra(MTRO)	PP	1	PP	3	-23.0744	5.2280	19	-4.41	0.0003
tra(MTRO)	MA	2	PP	2	-0.8033	2.2955	19	-0.35	0.7302
tra(MTRO)	MA	2	MA	3	-8.9967	5.3738	19	-1.67	0.1105
tra(MTRO)	MA	2	PA	3	2.0033	5.3738	19	0.37	0.7134
tra(MTRO)	MA	2	PP	3	-3.1100	5.3738	19	-0.58	0.5696





tra(MTRO)	PP	2	MA	3	-8.1933	5.2078	19	-1.57	0.1322
tra(MTRO)	PP	2	PA	3	2.8067	5.2078	19	0.54	0.5962
tra(MTRO)	PP	2	PP	3	-2.3067	5.2078	19	-0.44	0.6628
tra(MTRO)	MA	3	PA	3	11.0000	7.1225	19	1.54	0.1390
tra(MTRO)	MA	3	PP	3	5.8867	7.1225	19	0.83	0.4188
tra(MTRO)	PA	3	PP	3	-5.1133	7.1225	19	-0.72	0.4815

Tests of Effect Slices

Effect	MTRO	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
tra(MTRO)	1	0	.	.	.
tra(MTRO)	2	1	19	0.12	0.7302
tra(MTRO)	3	2	19	1.19	0.3246

----- PROF=2 -----

Procedimiento Mixed

Model Information

Conj. datos	WORK.TMP
Variable dependiente	PAHAF
Estructura de covarianza	Variance Components
Efecto de grupo	MTRO
Método de estimación	REML
Método de varianza del residual	Nada
Método SE de efectos fijos	Basado en el modelo
Método de grados de libertad	Between-within

Información de nivel de clase

Class	Levels	Values
BLO	3	1 2 3
tra	3	MA PA PP
MTRO	3	1 2 3
plot	9	1 2 3 4 5 6 7 8 9

Dimensions

Parámetros de covarianza	3
Columnas en X	10
Columnas en Z	0
Asuntos	27
Obs máx por asunto	1
Observaciones utilizadas	27
Observaciones no utilizad	0
observaciones totales	27

Iteration History

Iteration	Evaluations	-2 Res Log Like	Criterion
0	1	147.63800747	
1	2	139.42457332	0.00354290
2	1	139.21670946	0.00024604
3	1	139.20321729	0.00000171
4	1	139.20312785	0.00000000

----- PROF=2 -----

Procedimiento Mixed

Se ha cumplido el criterio de convergencia.

Estimadores de parámetro de covarianza

Cov Parm	Group	Estimador	Error estándar	Z Value	Pr Z
----------	-------	-----------	----------------	---------	------





Residual	MTRO 1	14.4208	7.9806	1.81	0.0354
Residual	MTRO 2	188.60	105.23	1.79	0.0365
Residual	MTRO 3	41.8832	26.6074	1.57	0.0577

Fit Statistics

Verosimilitud	-2 Res Log	139.2
AIC (mejor más pequeño)		145.2
AICC (mejor más pequeño)		146.8
BIC (mejor más pequeño)		149.1

Test del ratio de verosimilitud del modelo nulo

DF	Chi-Square	Pr > ChiSq
2	8.43	0.0147

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
BLO	2	19	1.12	0.3470
tra(MTRO)	5	19	33.84	<.0001

Least Squares Means

Effect	tra	MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	42.2211	1.2658	19	33.35	<.0001
tra(MTRO)	MA	2	88.1100	7.9288	19	11.11	<.0001
tra(MTRO)	PP	2	94.6100	5.6065	19	16.87	<.0001
tra(MTRO)	MA	3	64.5567	3.7364	19	17.28	<.0001
tra(MTRO)	PA	3	65.7767	3.7364	19	17.60	<.0001
tra(MTRO)	PP	3	63.0000	3.7364	19	16.86	<.0001

----- PROF=2 -----

Procedimiento Mixed

Differences of Least Squares Means

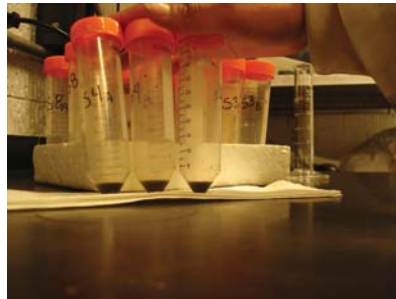
Effect	tra	MTRO	_tra	_MTRO	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
tra(MTRO)	PP	1	MA	2	-45.8889	8.0292	19	-5.72	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	PP	2	-52.3889	5.7476	19	-9.11	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	MA	3	-22.3356	3.9450	19	-5.66	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	PA	3	-23.5556	3.9450	19	-5.97	<.0001
tra(MTRO)	PP	1	PP	3	-20.7789	3.9450	19	-5.27	<.0001
tra(MTRO)	MA	2	PP	2	-6.5000	9.7108	19	-0.67	0.5113
tra(MTRO)	MA	2	MA	3	23.5533	8.7651	19	2.69	0.0146
tra(MTRO)	MA	2	PA	3	22.3333	8.7651	19	2.55	0.0196
tra(MTRO)	MA	2	PP	3	25.1100	8.7651	19	2.86	0.0099
tra(MTRO)	PP	2	MA	3	30.0533	6.7375	19	4.46	0.0003
tra(MTRO)	PP	2	PA	3	28.8333	6.7375	19	4.28	0.0004
tra(MTRO)	PP	2	PP	3	31.6100	6.7375	19	4.69	0.0002
tra(MTRO)	MA	3	PA	3	-1.2200	5.2841	19	-0.23	0.8199
tra(MTRO)	MA	3	PP	3	1.5567	5.2841	19	0.29	0.7715
tra(MTRO)	PA	3	PP	3	2.7767	5.2841	19	0.53	0.6053

Tests of Effect Slices

Effect	MTRO	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F
tra(MTRO)	1	0	.	.	.
tra(MTRO)	2	1	19	0.45	0.5113
tra(MTRO)	3	2	19	0.14	0.8713



ANEXO I Álbum fotográfico



I.1. Procedimiento para la extracción de ácidos húmicos y fúlvicos



I.2. Lectura en el espectro de ultravioleta y luz visible para la determinación de la relación E4/E6





I.3. Diseño de tratamientos



I.4. Módulo de Producción de Leche en Pastoreo (UACH)

