

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

Departamento académico de ciencias agrarias



**INFLUENCIA DEL SISTEMA DE MANEJO DEL SUELO Y
EL CARBONO ORGÁNICO DE LAS FRACCIONES
HÚMICAS SOBRE LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS
EN LA CIUDAD DE JABOTICABAL, BRASIL**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

LLERMÉ NAVARRO VÁSQUEZ

Tingo María – Perú

2017

DEDICATORIA

Para mis padres quienes me han demostrado que con perseverancia todo se puede lograr en esta vida, que una vida sin problemas no es vida y que el éxito sin fracasos no se consigue. A mi madre Llermé Vásquez Peñaherrera y mi padre Manuel Navarro Cárdenas (Q.E.P.D), es a ellos que dedico este trabajo por ser las personas que han compartido conmigo muchas alegrías y sacrificios en la vida.

AGRADECIMIENTO

La autora de la tesis titulada “Influencia del sistema de manejo del suelo y el carbono orgánico de las fracciones húmicas sobre la estabilidad de agregados en la ciudad de Jaboticabal, Brasil hace constar un sincero agradecimiento a todos aquellos quienes estuvieron involucradas en la culminación exitosa de este trabajo de investigación:

A Dios por darme la vida, por la fe, amor, protección, salud y sabiduría para que pudiese alcanzar un objetivo más.

A mi madre y a mi padre, por la vida, enseñanzas, educación e incentivo.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Agronomía y docentes que contribuyeron en mi formación académica universitaria.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y Veterinarias de la Universidad Estadual Paulista (UNESP), Campus de Jaboticabal, São Paulo, Brasil, por su excelente ayuda y por la infraestructura ofrecida para la realización del proyecto de investigación.

Al Prof. Dr. José Eduardo Corá, por la oportunidad de realizar este trabajo, por los valiosos consejos y asesoramiento en la tesis.

A la CAPES (Coordinación de perfeccionamiento Personal de Nivel Superior) por el financiamiento de la tesis.

A los miembros del jurado de tesis Dr. José W. Zavala Solórzano, Blgo.
M.Sc. Miguel A. Huauya Rojas, Dr. Hugo A. Huamaní Yupanqui por sus
sugerencias para la corrección de la tesis y aporte científico.

INDICE GENERAL

	Página
I INTRODUCCIÓN.....	12
II REVISIÓN DE LITERATURA.....	16
2.1 Concepto general del orden Oxisols	16
2.1.1 Distribución a nivel mundial	16
2.1.2 Potencialidades y limitaciones	17
2.1.3 Procesos formadores	17
2.1.4 Propiedades y características	18
2.1.5 Influencia de los oxisols en la estabilidad de los agregados	19
2.2 Materia orgánica del suelo	21
2.3 Formación de las sustancias húmicas	23
2.3.1 Teoría de la lignina	25
2.3.2 Teoría del polifenol	26
2.4 Concepto y estructura de las sustancias húmicas	29
2.4.1 Características químicas y formulas de las sustancias húmicas	31
2.4.1.1 Ácidos fúlvicos	32
2.4.1.2 Ácidos húmicos	32
2.4.1.3 Humina	36
2.5 Manejo del suelo y contenido de la materia orgánica del suelo	36
2.6 Agregación del suelo	40
2.7 Agregación del suelo y la materia orgánica del suelo.....	42

3.5.2	Estabilidad de los agregados con el uso de un único tamiz	76
3.6	Análisis estadístico.....	79
IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
4.1	Carbono orgánico y las sustancias húmicas en el suelo	81
4.2	Agregación del suelo	85
4.3	Relaciones entre los atributos químicos, el carbono orgánico del suelo y la agregación del suelo	89
V	CONCLUSIONES	95
VI	RECOMENDACIONES	97
VII	RESUMEN	98
VIII	BIBLIOGRAFÍA	100
IX	ANEXO	114

INDICE DE CUADROS

	Página
1. Coordenadas UTM y geográficas de los sistemas en estudio	50
2. Características químicas y granulométricas en los diferentes sistemas.....	66
3. Cantidad del carbono orgánico del suelo (COS) en las fracciones húmicas del suelo sobre diferentes sistemas	82
4. Diámetro medio ponderado (DMP) de agregados estables y el índice de estabilidad de agregados (IEA) del suelo, en diferentes sistemas.....	85
5. Coeficientes de correlación entre los atributos químicos y el carbono orgánico del suelo (COS), sobre diferentes sistemas	90
6. Coeficientes de correlación del diámetro medio ponderado (DMP) e índice de estabilidad de agregados (IEA) vs. Los parámetros químicos, sobre diferentes sistemas	91
7. Coeficientes de correlación del carbono orgánico total (COT) y las fracciones húmicas con el diámetro medio ponderado (DMP) y el índice de estabilidad de agregados (IEA), sobre diferentes sistemas.	93
8. Datos originales resumidos del suelo con sistema de bosque.....	115
9. Datos originales resumidos del suelo con sistema de pasto.....	116
10. Datos originales resumidos del suelo con sistema convencional (PC)	117
11. Datos originales resumidos del suelo con sistema de siembra directo con rotación de soya/maíz (SDSM).....	118
12. Datos originales resumidos del suelo con sistema de siembra directa con monocultivo de maíz (SDMM)	119

INDICE DE FIGURAS

	Página
1. Teoría de la lignina	26
2. Teoría de los polifenoles	28
3. Estructura modelo del ácido húmico	34
4. Estructura modelo del ácido fúlvico	34
5. Característica de los ácidos húmicos y fúlvicos	35
6. Localización de aéreas estudiadas: 1) bosque; 2) pasto; 3) siembra directa con monocultivo de maíz (SDMM); 4) siembra directa con rotación soya/maíz (SDSM); 5) sistema convencional (PC).	52
7. Vista del área de bosque	53
8. Vista del área de pasto	53
9. Vista del área experimental de siembra convencional (PC).....	54
10. Vista del área experimental del sistema de siembra directa (SSD), teniendo siembra directa con monocultivo de maíz (SDMM); y siembra directa con rotación soya/maíz (SDSM).....	54
11. Colecta de muestras de suelo en las entrelineas del SSD, con monocultivo de maíz (SDMM) y con rotación soya/maíz (SDSM).....	58
12. Colecta de muestras de suelo en el sistema convencional (PC)	58
13. a. Muestras colectadas en campo antes de su preparación, b. Secado de las muestras de suelo	59
14. a. Identificación de las muestras de suelo: siembra directa con monocultivo de maíz (SDMM), siembra directa con rotación soya/maíz (SDSM), sistema de siembra convencional (PC).....	60

15.	Agitador rotatorio de Wiegner, para análisis textural	61
16.	a. Separación de fracción de arena, b. Separación de la suspensión.	61
17.	a. Extracción de la fracción de arena, b. secado de la arena..	62
18.	Suspensiones de limo, arcilla (probetas) y la fracción de arena (beckers).....	63
19.	a. Agitación de la suspensión, b. medición de temperatura	63
20.	a. Extracción de la fracción de arcilla, b y c. Transferencia de la fracción de arcilla, d. secado de la fracción de arcilla.	64
21.	a. y b. Proceso de agitación del extracto alcalino (EA) y el suelo (S) .	67
22.	a. Proceso de centrifugación del EA+S, b. separación entre el EA y el residuo (humina).	67
23.	Extractos alcalinos de los diferentes sistemas de manejo.	68
24.	a. Ajuste del pH del EA, b. Separación del ácido fúlvico y húmico	69
25.	Fracciones del ácido fúlvico (FAF) y ácido húmico (FAH), b. Muestras con las FAH (izquierda) y las FAF (derecha).	69
26.	Obtención de la humina	70
27.	Estabilidad de los agregados con uso de múltiples tamices: a y b. Proceso de tamizado, c. Agregados entre 6,30–4,00 mm	72
28.	a y b. Pesaje de agregados entre 6,30–4,00 mm, c. Conjunto de tamices	73
29.	a. y b. Máquina para oscilación vertical..	74
30.	a. Juegos con tamices, b. Codificación en las clases de tamices.	75
31.	Sustracción de las cantidades de arena.	75
32.	Estabilidad de los agregados con uso de un único tamiz	76

33.	a. Codificación de las muestras en relación a los tamices, b. y c. Posicionamiento y transferencia de los agregados, d. oscilación de los agregados	78
34.	a, b, c y d. Proceso de obtención del material retenido en el tamiz 0,25 mm.....	79

I. INTRODUCCIÓN

Sin considerar las reservas fósiles, el suelo es la mayor reserva de carbono terrestre, conteniendo cerca de dos veces la cantidad de carbono de la atmósfera y de la biomasa vegetal. Los beneficios de la materia orgánica en la calidad del suelo están relacionados con la fracción humificada que es la reserva más estable del carbono orgánico del suelo, por ser un componente eficiente en la estabilidad estructural del suelo, con reflejos en la mayor resistencia a la erosión.

Los bosques primarios o nativos son considerados un ecosistema sostenible, debido al equilibrio existente entre ganancias y pérdidas del carbono orgánico, que preserva la estructura del suelo. El proceso de conversión de los bosques nativos en sistemas de explotación agrícola lleva a una reducción de carbono en el suelo, debido al aumento del proceso de descomposición de la materia orgánica del suelo y reducción de las cantidades de material vegetal adicionados al suelo, además de la diferencia en su calidad y residuos vegetales provenientes de un bosque nativo, todo estos procesos mencionados se reflejan en una serie de alteraciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, tales como la reducción de la biodiversidad del suelo, disponibilidad de nutrientes, estructura del suelo, infiltración de agua y aumento en la susceptibilidad del suelo a la compactación y a la erosión. De esa forma, el equilibrio del sistema es afectado, de modo que las pérdidas superan las ganancias de carbono, reduciendo así la cantidad de carbono en el suelo.

Ambientes distintos poseen diferencias en la constitución del carbono orgánico total (COT) presente en el suelo y en la distribución de las sustancias húmicas que componen el COT, debido a la cantidad y calidad del material vegetal adicionado al suelo. La cantidad de carbono orgánico de las sustancias húmicas han sido utilizadas como indicadores de la calidad del suelo, en razón de la fuerte interacción con el material mineral y por permitir una detección más rápida de los cambios en los contenidos de carbono presentes en el suelo asociados al manejo.

En general, la evaluación de carbono presente en el suelo es realizada por medio de la determinación de las cantidades de COT. Sin embargo, gran parte del COT es representada por las sustancias húmicas, que constituyen entre el 85 a 90% del COT.

Las sustancias húmicas son: los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y humina, definidas con base en la solubilidad de un medio ácido o alcalino. Las moléculas de los ácidos fúlvicos presentan menor peso y tamaño molecular y poseen mayor movilidad en el suelo, siendo responsables por los mecanismos de transporte de cationes en el suelo. Los ácidos húmicos contribuyen con la mayor parte de la capacidad de cambio de cationes (CCC) de origen orgánica. La humina presenta el mayor grado de polimerización entre las sustancias húmicas, siendo la fracción predominante en los suelos tropicales, representando más del 50% de carbono orgánico presente en el suelo. A pesar de poseer baja reactividad, la humina presenta elevada interacción con la

fracción mineral del suelo, teniendo como consecuencia, elevada participación en la formación y estabilidad de agregados en la mayoría de los suelos tropicales.

Varios trabajos demostraron correlaciones positivas entre los valores del COT y la agregación del suelo. Los resultados demuestran que las prácticas de manejo pueden influenciar en la agregación del suelo y, consecuentemente, en su estructura y en la recuperación del carbono humificado presente en el suelo. Con todo esto, aun son escasas investigaciones que analizan la influencia de las sustancias húmicas en la estabilidad de agregados de suelos tropicales con el objetivo de mejorar el manejo del suelo.

Según lo expuesto, se estableció la hipótesis, que de acuerdo al manejo del suelo, las formas de carbono de las sustancias húmicas influyen en la agregación del suelo.

Finalmente, los objetivos que se plantearon en la ejecución de la tesis se describen de la siguiente manera:

- Objetivo general
 - Evaluar la influencia de los sistemas de manejo del suelo (sistema de siembra directa, sistema de siembra convencional, bosque y pasto) en el carbono orgánico de las fracciones húmicas, atributos químicos y estabilidad de agregados en la ciudad de Jaboticabal, Brasil.

- Objetivos específicos
 - Determinar los valores totales del C orgánico en el suelo mediante la determinación del COT (carbono orgánico total) y las fracciones húmicas de los ácidos húmicos (C-AH), ácidos fúlvicos (C-AF) y humina (C-HUM), de diferentes sistemas de manejo del suelo.
 - Determinar los valores de estabilidad de agregados en agua para el cálculo de los índices de agregación: DMP (diámetro medio ponderado) y IEA (índice de estabilidad de los agregados) del suelo, de diferentes sistemas de manejo del suelo.
 - Analizar la correlación entre los atributos químicos del suelo con los valores del C orgánico (COT, C-AH, C-AF y C-HUM) y los índices de agregación (DMP y IEA), y aun la correlación entre los valores del C orgánico y los índices de agregación del suelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Concepto general del orden Oxisols

La principal característica de los Oxisols (SOIL SURVEY STAFF, 2006) es la existencia de un horizonte óxido rico en hidróxidos y óxidos meteorizables, son suelos minerales de las zonas tropicales cálidas y húmedas que han sufrido intensos y prolongados procesos de meteorización y lavado, lo que posibilita la formación de éstos suelos maduros (ORTIZ y GUTIÉRREZ, 2006).

Se desarrollan bajo condiciones climáticas en las que la precipitación es mucho mayor que la evapotranspiración (durante algunos períodos del año); esto posibilita el lavado de los productos meteorizables hacia el interior del perfil del suelo y la acumulación de caolinita y sesquióxidos necesarios para la formación del horizonte óxido. Las condiciones climáticas suelen darse en regímenes de humedad desde áridas a pre húmedas (GISBERT, 2002).

Son suelos en los que predominan los óxidos de hierro y de aluminio y la caolinita, de baja capacidad de intercambio catiónico (CIC). El horizonte óxido se sitúa a unos 30 cm por debajo de la superficie del suelo (GISBERT y IBAÑEZ, 2010).

2.1.1 Distribución a nivel mundial

Los oxisols tienen una amplia representación en países tropicales,

siendo en Sudamérica y África donde con mayor extensión podemos encontrarlos. A nivel mundial los oxisols ocupan aproximadamente 750 millones de hectáreas, lo que representa un 7.50% de las tierras emergidas y el 8.73% de los suelos del mundo (MARTINS *et al.*, 2009).

2.1.2 Potencialidades y limitaciones

La mayor parte de los oxisols están dedicados a ganadería extensiva o a cultivos itinerantes, a pesar de tener muchos de ellos excelentes propiedades físicas y adecuada topografía para la producción intensiva de cultivos (ORTIZ y GUTIÉRREZ, 2006).

Los oxisols presentan severas limitaciones para fines agropecuarios como consecuencia del excesivo lavado de nutrientes del suelo y del alto riesgo de procesos de erosión irreversible; por todo ello se mantienen como reservas o zonas forestales.

2.1.3 Procesos formadores

La meteorización es muy intensa en los oxisols, mostrándose sus efectos a profundidades mayores que en otros órdenes de suelos. Debido a la meteorización, la mayoría de los minerales primarios y los minerales de arcillas tipo 2:1 han sido transformados al tipo 1:1 (como la caolinita o la gibbsita) y a hidróxidos y óxidos de hierro y aluminio secundarios (GISBERT e IBAÑEZ, 2010).

La formación de gibbsita requiere una rápida y casi inmediata remoción de los productos solubles resultantes de la meteorización, cationes básicamente, y particularmente de sílice (proceso de desilicación). Ambos procesos formadores (meteorización y desilicación) se refuerzan con condiciones de drenaje libre, intensas lluvias y una apropiada posición de la capa freática permitiendo que los iones ferrosos producidos por hidrólisis sean oxidados inmediatamente y eliminados de la reacción al precipitar como ion férrico (GISBERT e IBAÑEZ, 2010).

La humificación es un proceso que se presenta en todos los oxisols debido a que en climas con temperaturas templadas o altas durante todo el año los residuos orgánicos se humifican y mineralizan rápidamente (LIU *et al.*, 2005).

2.1.4 Propiedades y características

Los oxisols son suelos casi uniformes sin horizontes claramente marcados. Estos suelos contienen pocos minerales (mezclas de cuarzo, caolín, óxidos libres y materia orgánica) siendo a menudo ricos en los minerales de óxidos de hierro y aluminio (MARTINS *et al.*, 2009).

Según (RAIJ *et al.*, 2001), los oxisols se caracterizan por su fertilidad extremadamente baja, resultando reservas de nutrientes muy bajas por la baja CIC.

Los suelos oxisols presentan características como:

- Suelos profundos,
- Bien drenados,
- Colores uniformes,
- Textura arcillosa,
- Contenido bajo de limo.
- Diferenciación en horizontes no muy claros.
- Ausencia de películas de arcilla.
- Estructura de agregados finos estables que forman una estructura porosa.
- Consistencia friable o muy friable en húmedo, adhesivo y plástico en mojado.
- Gran estabilidad de los agregados debido a la naturaleza de la arcilla.
- Porosidad grande.
- Cierta tendencia a formar costras superficiales.
- Percolación rápida de agua.
- Baja susceptibilidad a la erosión.
- Desarrollo de raíces profundo.

2.1.5 Influencia de los oxisols en la estabilidad de los agregados

Los oxisols son suelos fuertemente meteorizados, dominados por arcillas de baja actividad; las arcillas generalmente se encuentran floculadas y las micelas tienden a mantenerse unidas debido a su carga eléctrica, especialmente en condiciones acidas (RAIJ *et al.*, 2001).

Como hay pocas fuerzas repulsivas entre las partículas de las arcillas, estas se reúnen fácilmente en agregados que casi no liberan arcillas móviles (FREY, 2005). Además de las arcillas (básicamente caolinita), estos suelos contienen cantidades apreciables de óxidos de hierro en varios grados de hidratación y cristalización, asociados con hidróxidos de aluminio. Ambos minerales también tienen una fuerte influencia en la agregación de las partículas del suelo, ya que actúan como agentes cementantes entre las partículas de arcilla física (TISDALL y OADES, 1982).

En condiciones de buen drenaje, el hierro se fija sobre la superficie de los agregados en la forma de partículas discretas entre las láminas de las arcillas, por un proceso de precipitación física (RAIJ *et al.*, 2001). Este fenómeno típico en suelos fuertemente meteorizados de naturaleza óxica, además de enmascarar parcialmente las propiedades de las arcillas, contribuye a la estabilidad estructural de los agregados. Otra fuerza que contribuye a la agregación es la atracción eléctrica entre los cristales de arcilla cargados negativamente y las cargas positivas de los sesquióxidos (MARTINS *et al.*, 2009).

La estabilidad de los agregados está en función al contenido de arcilla, ya que, a mayor contenido de arcilla, generalmente hay un mayor contenido de óxidos libres de hierro. Los oxisols con bajos contenidos de arcilla generalmente tienen agregados menos estables (MARTENS, 2000).

Según RAIJ *et al.* (2001), el color característico de los oxisols se debe principalmente a sus altos contenidos de óxidos de hierro; el color está determinado tanto por el tipo de óxido de hierro dominante, como por su abundancia relativa. Aunque parte el hierro presente se puede encontrar en la forma de agregados o nódulos del tamaño de las arenas, la mayoría (hierro no agregado) se encuentra en la fracción arcillosa ($< 0,2 \mu\text{m}$).

2.2 Materia orgánica del suelo

El termino materia orgánica de los suelos se refiere a todos los compuestos que contienen carbono orgánico en el suelo, incluyendo los microorganismos vivos y muertos, residuos de animales y plantas en diversas etapas de descomposición, biomasa microbiana, las raíces y la fracción más estable llamado humus (SANTOS y CAMARGO, 1999).

La materia orgánica del suelo juega un papel clave en las funciones del suelo, siendo, por eso, considerada la principal característica indicadora de su calidad, por presentar una fuerte interrelación con casi todas las propiedades físicas, químicas y, biológicas del suelo, ejerciendo una fuerte influencia en su capacidad productiva y de modo muy intenso en la nutrición de las plantas (COSTA *et al.*, 2009).

La reducción y/o alteración de la calidad de la materia orgánica del suelo afecta directamente la calidad del suelo (HERMLE *et al.*, 2008), pues la materia orgánica del suelo es el componente esencial que ocurre en los ecosistemas

terrestres, dentro de los cuales se destacan: la estructuración del suelo, reducción de la contaminación de agua, el taponamiento del pH del suelo, disponibilidad de aire y agua a las raíces de las plantas y el desarrollo del sistema radicular (CONCEIÇÃO *et al.*, 2005).

Varios factores, como el clima, la vegetación original, textura, tipo y manejo del suelo y, principalmente, la cantidad y calidad de los residuos vegetales han sido apuntados como controladores de materia orgánica del suelo (COSTA *et al.*, 2009; MAIA *et al.*, 2009). Sobre todo en las regiones tropicales, debido a las limitaciones de la mayoría de los suelos relacionadas a las propiedades químicas, como baja reserva de nutrientes, pequeña cantidad de material orgánico, acelerada oxidación, gran exigencia de fosfato, de moderada a alta acidez, a su interacción con todos los procesos que ocurren en el suelo (MAIA *et al.*, 2009).

Cuando los bosques primarios son alterados por cambios en sistemas agrícolas o pecuarios, el equilibrio dinámico es destruido y, normalmente, las entradas de carbono en el suelo son menores que las salidas, que conduce a la reducción de la cantidad y alteración de la calidad de la materia orgánica del suelo, siendo mayor en áreas de relevo ondulado, en las cuales se acentúan los procesos erosivos (CERRI *et al.*, 2008).

Sistemas agrícolas proporcionan reducción de carbono en el suelo, debido al aumento de la descomposición de la materia orgánica del suelo,

como también reducción de las cantidades de material vegetal adicionadas al suelo, además de la diferencia de la calidad de los residuos cuando comparados a los residuos vegetales provenientes de un bosque. En suelos de bosque primario, la liberación de nutrientes por la hojarasca y la absorción de nutrientes por las plantas ocurren en sincronía, manteniendo estables las cantidades del carbono orgánico del suelo (CAMPOS, 2004).

Las pérdidas de la materia orgánica del suelo en sistemas agrícolas son debidas, principalmente, por el revolvimiento del suelo, influenciando en la temperatura, humedad, aeración, ruptura de agregados y la incorporación de los residuos vegetales al suelo (BAYER y MIELNICZUC, 1997).

2.3 Formación de las sustancias húmicas

Estudios sobre la formación y estructura de las sustancias húmicas no son recientes. A finales del siglo XIX, se consideraba que las sustancias húmicas poseían principalmente naturaleza coloidal y propiedades ligeramente ácidas. También existía información acerca de su interacción con otros componentes del suelo y la noción de que los ácidos húmicos serían esencialmente lignina modificada.

A principios de los años 30 del siglo XX, se sabía que los ácidos húmicos eran los componentes más característicos de las sustancias húmicas. Se deducía que había existencia de grupos carboxílicos y los ácidos húmicos eran formados principalmente por compuestos de nitrógeno (proteínas) y

anillos aromáticos derivados de lignina (STEVENSON, 1994).

Se postularon diferentes teorías para la formación de las sustancias húmicas durante la descomposición de restos de origen animal o vegetal. La teoría clásica postulada por WAKSMAN (1932), fundamentando que las sustancias húmicas provienen de la modificación de ligninas. En la actualidad la mayoría de los investigadores apoya los mecanismos que involucran a las quinonas.

En la naturaleza deben considerarse los cuatro mecanismos, incluyendo la vía de condensación de azúcares y aminas, como igualmente probables para la síntesis de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. Las cuatro vías pueden ocurrir en cualquier tipo de suelo, pero según las condiciones ambientales prevalecerá alguna de ellas sobre el resto. En suelos poco drenados y en sedimentos húmedos predomina la vía de las ligninas, mientras que en suelos forestados es más importante la vía de los polifenoles.

La vía de insolubilización se refiere a la humificación de los compuestos fenólicos solubles, a partir de su oxidación de quinona y polimerización, formando inicialmente dímeros y trímeros, que componen la mayor parte de la policondensación de los núcleos aromáticos. A partir de la policondensación de estos compuestos (dímeros y trímeros) son formados los ácidos fúlvicos, los cuales se condensan, formando los ácidos húmicos (DUCHAUFOR, 1982).

Por presentar alta complejidad química y la interacción fuerte con la fracción coloidal inorgánico del suelo, estas sustancias se descomponen lentamente y se acumulan en los suelos. Las sustancias húmicas son formadas a partir de un proceso llamado humificación. Dentro de las varias posibilidades, se encuentra desde la clásica al tener en cuenta que son formadas a partir de lignina modificada hasta la teoría más aceptada hoy en día, la llamada ruta de polifenoles.

Las rutas que envuelven la síntesis de las sustancias húmicas a partir de la condensación de polifenoles y compuestos de Amino que son los más aceptados en la actualidad (PICCOLO, 1999).

2.3.1 Teoría de la lignina

Por muchos años se pensó que las sustancias húmicas se originaban a partir de la descomposición de la lignina. De acuerdo a esta teoría, la lignina es utilizada en forma incompleta por los microorganismos del suelo, y el residuo pasa a formar parte del humus.

Entre las modificaciones sufridas en la lignina se incluyen la pérdida de grupos metoxi (OCH_3) para generar OH fenólicos, y la oxidación de cadenas alifáticas para formar grupos carboxilo (COOH).

Este material modificado sufre posteriormente otros cambios para generar primero el ácido húmico y luego ácido fúlvico. Waksman describe esta

teoría, la que se resume en la Figura 1, y cita como evidencia para corroborarla que tanto las ligninas como los ácidos húmicos son difícilmente degradados por la mayoría de las bacterias y los hongos, que ambos son parcialmente solubles en alcohol y piridina, precipitan en medio ácido y son solubles en medio alcalino, que ambos presentan grupos metoxi, que ambos son ácidos en medios naturales, que cuando se calientan ligninas en medio alcalino se transforman en ácidos húmicos metoxilados, y que los ácidos húmicos poseen propiedades similares a las ligninas oxidadas.

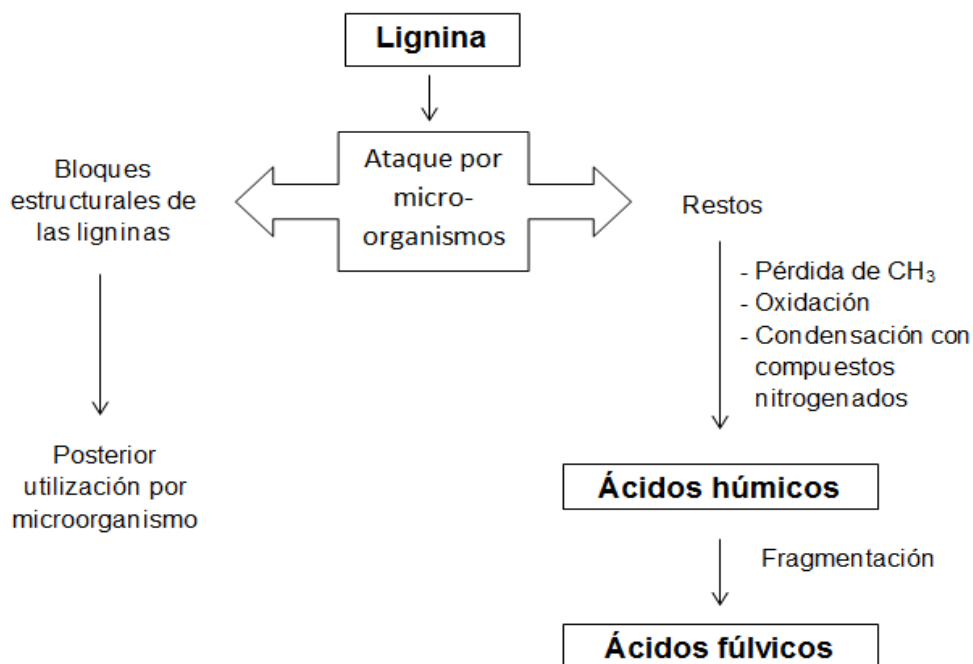


Figura 1. Teoría de la lignina (WAKSMAN, 1932).

2.3.2 Teoría del polifenol

Esta teoría incluye dos mecanismos cuya diferencia es el origen de los polifenoles. En uno de los mecanismos, los aldehídos y ácidos fenólicos,

que se generan durante la degradación de ligninas por los microorganismos del suelo, producen quinonas por reacciones enzimáticas, las que se polimerizan para formar macromoléculas del tipo de las sustancias húmicas (SCHNITZER *et al.*, 1991).

El otro mecanismo es similar, excepto que los compuestos polifenólicos son sintetizados por microorganismos a partir de sustratos distintos de la lignina (por ejemplo celulosa). Los polifenoles son luego oxidados enzimáticamente a quinonas y posteriormente convertidas en sustancias húmicas. De acuerdo a estos conceptos, las quinonas provenientes de la lignina y los sintetizados por los microorganismos son los bloques principales a partir de los cuales se forman las sustancias húmicas. La formación de compuestos de color oscuro a partir de reacciones en las que participan quinonas ya fue observado en la formación de melanina (STEVENSON, 1982).

El rol de los microorganismos en la formación de polifenoles fue enfatizado por KONONOVA (1966), quien propone que las sustancias húmicas son formadas por mixobacterias que degradan celulosa antes que por descomposición de ligninas. Las etapas que postula Kononova (Figura 2) para la formación de las SH son:

- Primero la degradación total por los hongos del suelo de carbohidratos simples, y parcial de proteínas y celulosa de la médula radicular y el

cortex de restos de plantas.

- Luego la celulosa del xilema es degradada por mixobacterias aeróbicas.

Los polifenoles sintetizados por estas bacterias son oxidados posteriormente a quinonas por la enzima polifenoloxidasas, y por último las quinonas reaccionan con compuestos nitrogenados para formar sustancias húmicas.

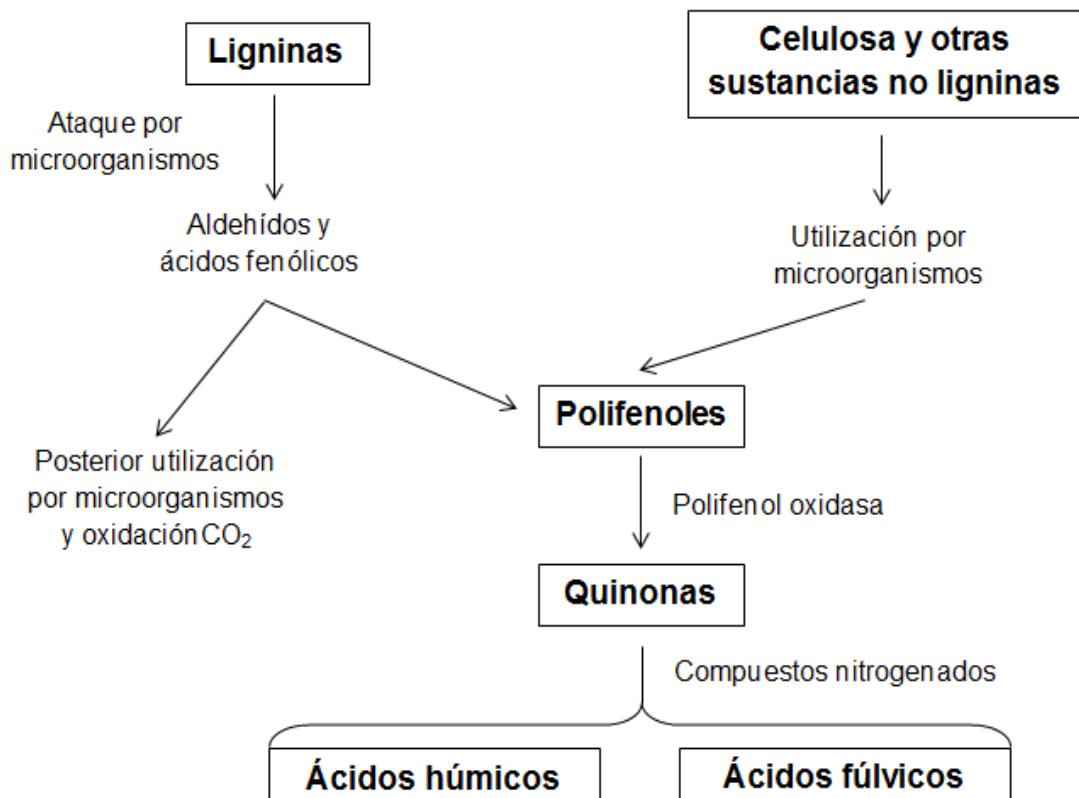


Figura 2: Teoría de los polifenoles (STEVENSON, 1982).

Muchos investigadores han tratado de desarrollar modelos químicos para representar las estructuras medias de estas sustancias tal como se presentaron el ácido húmico por STEVENSON (1982). La amplia variación en

el grado de polimerización, número de cadenas laterales y radicales pueden ser encontradas en las sustancias húmicas hace con que no exista similitud entre dos moléculas húmicas.

2.4 Concepto y estructura de las sustancias húmicas

La materia orgánica del suelo ha sido objeto de atención considerada en las investigaciones, sobre todo en la última década. Es constituida por C, H, O, N, S y P, con los contenidos 58%, 6%, 33% respectivamente y los tres últimos 3% (DUCHAUFOR, 1982). La materia orgánica del suelo puede ser dividida en dos grupos fundamentales: las bio-moléculas y las sustancias húmicas (STEVENSON, 1994; SANTOS y CAMARGO, 1999). El primer grupo es representado por los carbohidratos, grasas, ceras, proteínas y ácidos nucleicos (BARRETO *et al.*, 2008). El segundo comprende a las sustancias húmicas.

Estudios más recientes han demostrado que la materia orgánica del suelo en la fracción pesada asociada al material sedimentado (arena, limo y arcilla) comprende aproximadamente 80% del carbono orgánico total (COT) y están presentes en ella las fracciones estables denominadas sustancias húmicas.

De acuerdo con BENITES *et al.* (2003), las sustancias húmicas pueden ser definidas como una serie de polímeros amorfos de coloración amarillo, marrón a negro, de peso molecular relativamente alto y formado por reacciones de síntesis secundarias, bióticas y abióticas, generalmente clasificados de

acuerdo a su solubilidad en álcali y ácidos. Según STEVENSON (1982), las sustancias húmicas son químicamente muy similares, pero las fracciones pueden ser diferenciados unos de otros por el color, peso molecular, presencia de grupos funcionales, grado de polimerización y el contenido de C, O, H, N y S.

Las sustancias húmicas son divididas en tres fracciones con diferentes propiedades físico-químicas: ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) y humina. Las sustancias húmicas contribuyen alrededor del 85 - 90% de COT y son el principal componente de la materia orgánica del suelo, que consta con grandes reservas orgánicas del suelo (SANTOS, 2005). La parte humificada de la materia orgánica del suelo está formado por moléculas recalcitrantes de origen vegetal, animal y microbiana, y representa un estado indefinido de la materia orgánica del suelo.

Las sustancias húmicas desempeñan un importante papel en la retención de cationes, abastecimiento de nutrientes a los cultivos, masa microbiana y en la estabilidad de agregados. Esta última, por su vez, interfiere en la infiltración, retención de agua y aeración del suelo. Así, las sustancias húmicas constituyen un componente fundamental de la capacidad productiva de los suelos (BAYER y MIELNICZUCK, 1999).

Las sustancias húmicas representan casi la totalidad de la materia orgánica del suelo, debido a su gran reactividad, corresponden a la porción

envuelta en la mayoría de las reacciones químicas del suelo (CANELLAS *et al.*, 1999). Las sustancias húmicas destacan en muchas investigaciones, ya que representan la principal reserva de carbono en el suelo y aun integran con la atmosfera modificando la cantidad de CO₂, dependiendo del uso y manejo adoptado (PICCOLO, 1999).

La distribución de carbono orgánico en las tres fracciones de las sustancias húmicas depende del tipo de suelo, del tipo de vegetación, del uso y manejo empleado (STEVENSON, 1994; DICK y MARTINAZZO, 2006). El preparo intensivo del suelo, la quema de sus residuos y la mantención de cultivos con baja incorporación de residuos vegetales promueven la degradación de sus propiedades químicas y físicas (BAYER y MIELNICZUC, 1997). El conocimiento de la aplicación de técnicas que promuevan la mantención o recuperación de materia orgánica del suelo, permiten la búsqueda del equilibrio entre pérdidas y ganancias observados en ambientes sobre vegetación natural.

2.4.1 Características químicas y fórmulas de las sustancias húmicas

Con los recursos de la química moderna, la estructura molecular de las sustancias húmicas sigue siendo objeto de numerosos estudios y controversias, siendo formados por una mezcla heterogénea y bastante compleja de moléculas orgánicas, polimerizadas y con masa molecular bastante variada (STEVENSON, 1982).

Muchos investigadores han tratado de desarrollar modelos químicos para representar las estructuras medias de las sustancias húmicas tal como se presentaron las del ácido húmico por STEVENSON (1982).

2.4.1.1 Ácidos fúlvicos

Los ácidos fúlvicos son solubles en un medio alcali y en ácido diluido. Son constituidos principalmente por polisacáridos, aminoácidos y compuestos fenólicos, que son más reactivos que las otras dos fracciones por la mayor cantidad de grupos carboxílicos y fenólicos que contiene.

Estudios realizados en la acción directa de las sustancias húmicas sobre el metabolismo y crecimiento de las plantas se han centrado principalmente en los ácidos fúlvicos, la fracción humificada considerada de menor peso molecular, mayor solubilidad y movilidad en el suelo (DUCHAUFOR, 1982).

2.4.1.2 Ácidos húmicos

Los ácidos húmicos son solubles en medios alcalinos e insolubles en medio ácido diluido. Se han definido como sustancias de coloración oscura, compuestas por macromoléculas de masa molecular relativamente elevada, formadas por medio de reacciones de síntesis secundarias a partir de residuos orgánicos de plantas, animales y microorganismos (BENITES *et al.*, 2003).

Sin embargo, algunos estudios han sugerido nuevas

concepciones para las estructuras complejas de esas fracciones. Los ácidos húmicos presentan mayor contenido de C, menor de O y el contenido similar de H que los del ácido fúlvico (STEVENSON, 1994). Esto puede ser comprobado con los experimentos llevados a cabo por SANTOS y CAMARGO (1999), en muestras de un Ultisol.

El peso molecular relativo de los ácidos húmicos es mayor que el de los ácidos fúlvicos, que tienden a tener más compuestos aromáticos, menos carboxílicos y grupos C-O alquil de que los AF (STEVENSON, 1982), posiblemente debido a que tienen mayor contenido de estructuras de tipo polisacáridos. Entre las sustancias húmicas, los ácidos fúlvicos y ácidos húmicos son los más estudiados (Figura 3 y 4).

La composición media de las unidades básicas de los ácidos fúlvicos y ácidos húmicos, en términos de fórmulas químicas son, respectivamente $C_{135}H_{182}O_{95}N_5S_2$ y $C_{187}H_{186}O_{89}N_9S_2$ (STEVENSON, 1982). Los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos son bastante reactivos y esa mayor reactividad es debida principalmente a la presencia de grupos funcionales que contiene oxígeno, tales como grupos carboxilos e hidroxilos fenólicos que son responsables por su acidez.

La composición media de las unidades básicas de los ácidos fúlvicos y ácidos húmicos, en términos de fórmulas químicas son, respectivamente $C_{135}H_{182}O_{95}N_5S_2$ y $C_{187}H_{186}O_{89}N_9S_2$ (STEVENSON, 1982).

Los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos son bastante reactivos y esa mayor reactividad es debida principalmente a la presencia de grupos funcionales que contiene oxígeno, tales como grupos carboxilos e hidroxilos fenólicos que son responsables por su acidez.

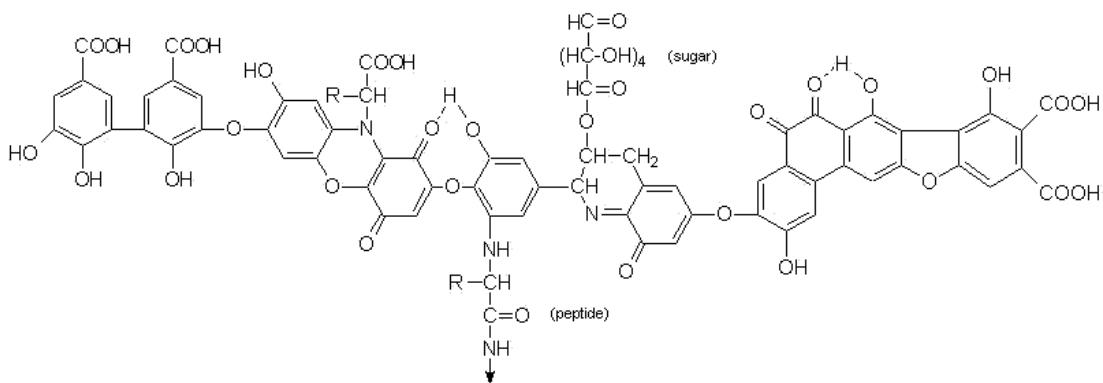


Figura 3. Estructura del modelo del ácido húmico (STEVENSON, 1982)

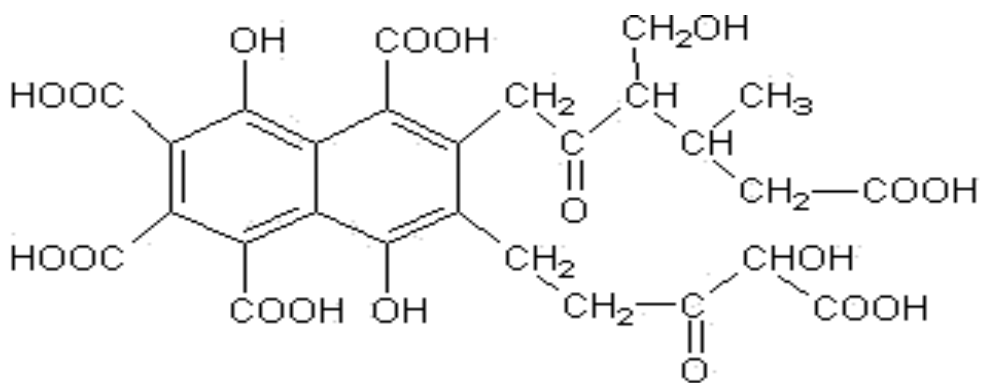


Figura 4. Estructura del modelo del ácido fúlvico (STEVENSON, 1982)

La acidez de los ácidos húmicos es menor que la del ácido fúlvico, que está relacionado con sus niveles más bajos por las cantidades de carboxilos (DUCHAUFOR, 1982). La relación C/N de los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos es superior en 50% a la media observada en la materia

orgánica del suelo, indicando menor grado de degradación, confiriéndole mayor estabilidad en el ambiente.

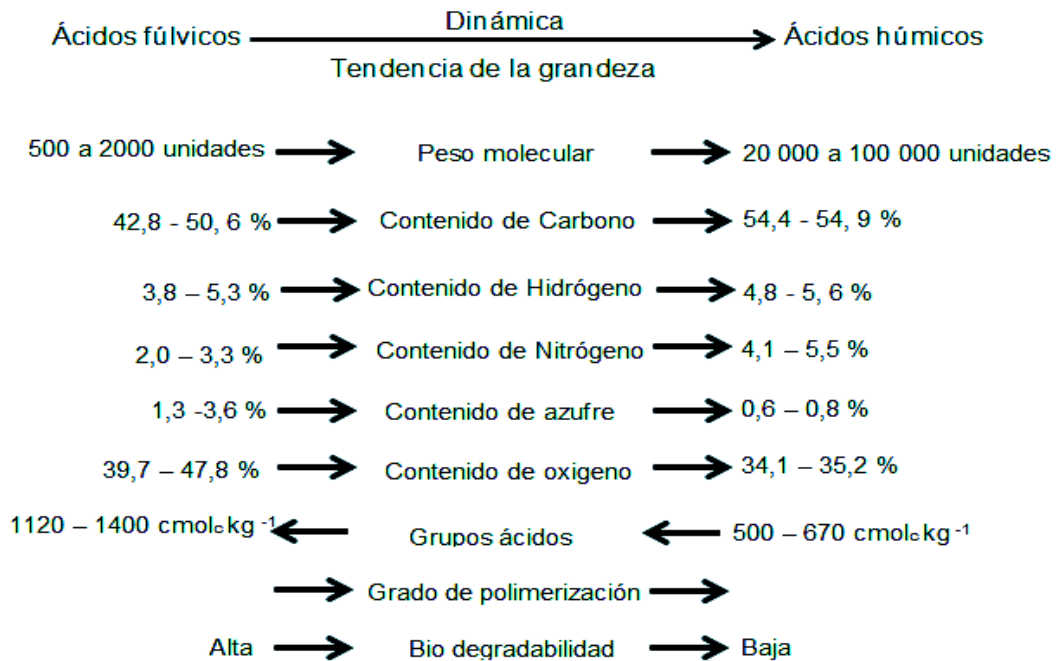


Figura 5. Características de los ácidos húmicos y fúlvicos

Con el grado de polimerización relativamente más alto de los ácidos húmicos, es posible observar una etapa más avanzada de humificación. Sin embargo, los ácidos fúlvicos contienen más grupos - COOH por unidad de masa en relación a los ácidos húmicos (Figura 5) y junto con la suma de los grupos fenólicos, caracterizan mayor acidez total, presentando mayor CIC que los ácidos húmicos. Incluso cuando se compara con una arcilla silicatada de tipo 2:1, que contiene un promedio de 200 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, las sustancias húmicas exceden la capacidad de amortiguación del suelo.

2.4.1.3 Humina

La humina es insoluble en medios alcalinos y ácidos y pueden tener una composición variable, tiene reducida capacidad de reacción. Su falta de sensibilidad en un medio acuoso puede ser debido simultáneamente a la alta hidrofobicidad y fuerte interacción con los componentes inorgánicos y también por tener compuestos lipídicos, estructuras de carbohidratos y aromáticos en diferentes proporciones (KONONOVA, 1966).

La humina presenta baja acidez en comparación con los ácidos fúlvicos y ácidos húmicos, que, junto con la fuerte asociación a los minerales, provoca insolubilidad en el medio alcalino acuoso (BENITES *et al.*, 2003). La insolubilidad de la humina puede ser proveniente de haber sido fuertemente adsorbida o unida a los componentes inorgánicos del suelo. La resistencia a la degradación microbiana de materiales húmicos también parece ser en gran parte debido a la formación de complejos metálicos y/o arcilla-orgánicas estables (SCHNITZER *et al.*, 1991).

2.5 Manejo del suelo y contenido de la materia orgánica del suelo

Dependiendo del uso y manejo empleado, la materia orgánica del suelo puede ser alterada con mayor o menor intensidad (BARRETO *et al.*, 2008), siendo el revolvimiento del suelo un importante papel en la distribución de sus fracciones (BAYER y BERTOL, 1999). En las últimas décadas, se ha dado atención especial a la rápida degradación de los suelos sobre explotación agrícola, especialmente en los países tropicales en desarrollo (LAL, 1997). De

acuerdo a esto, diferentes investigaciones han buscado analizar la materia orgánica del suelo, a fin de crear estrategias de manejo que reduzcan el impacto de la agricultura sobre el ambiente (PINHEIRO *et al.*, 2003; ALMEIDA *et al.*, 2005; SOUZA *et al.*, 2006).

En suelos de áreas forestales se encuentra mayor cantidad de carbono orgánico siendo mayor en la superficie debido a la contribución de la hojarasca de que en las raíces, quedando una mayor proporción localizada superficialmente (RUIVO *et al.*, 2005).

El acumulo de material orgánico en el sistema de siembra directa es debido a que no existe revolvimiento del suelo. De acuerdo a eso, la materia orgánica del suelo está menos expuesta al ataque de los microorganismos, pues, no hay quiebra de las estructuras que la protegen físicamente de los agentes descomponedores (ANDRADE *et al.*, 2009).

En estudios sobre la cantidad de carbono y emisiones de CO₂, influenciados por sistemas de manejo en el Sur de Brasil, indican que el sistema de siembra directa, asociado a cultivos que incorporan residuos vegetales ricos en carbono y nitrógeno, promueve un balance positivo de carbono en el suelo. Sin embargo, en áreas con sistema convencional y sistema de siembra directa, aliado a los cultivos de baja incorporación de carbono y nitrógeno, promueven un balance negativo de carbono en el suelo.

ALMEIDA *et al.* (2008), al evaluar el efecto de manejos y uso del suelo en las propiedades físicas y químicas de un oxisols, verificaron que, después de tres años del inicio con el sistema de siembra directa, hubo incremento de la materia orgánica del suelo en la profundidad de 0–10 cm. El sistema de siembra directa, en virtud de la mayor concentración de raíces en las capas superficiales y de deposición superficial de los residuos vegetales, aliado a la ausencia del revolvimiento del suelo, favorece el acumulo de materia orgánica del suelo (SILVA *et al.*, 2006).

Desde el punto de vista física del suelo, se ha recomendado que la adopción del sistema de siembra directa, aliado a la rotación de cultivos sirve para mantener y/o aumentar la materia orgánica del suelo (ANDRADE *et al.*, 2009). La cantidad de materia orgánica del suelo acumulada en el suelo es dependiente del manejo de cultivos adoptados (AMADO *et al.*, 2001). Generalmente, manejos que incluyen cultivos con alta producción de residuos vegetales y cultivos con baja relación C/N resultan, en general, mayores acúmulos de materia orgánica del suelo (ANDRADE *et al.*, 2009).

FONTENELE *et al.* (2009), Verificando alteraciones en los atributos físicos de un oxisols debido al manejo, observaron que el sistema de siembra directa y un área recién deforestada presentaron los mayores valores de la materia orgánica del suelo en la camada de 0-5 cm, en comparación al sistema convencional, los autores consideraron que el aumento de la materia orgánica del suelo fue debido a la deposición superficial de residuos y a la presencia de

residuos vegetales fácilmente descompuestos, en función de la deforestación reciente en el área de estudio.

Análisis de la materia orgánica del suelo en un oxisols sometido a diferentes manejos y uso de coberturas vegetales fueron realizados por PINHEIRO *et al.* (2003). En este estudio, los autores observaron que la humina tuvo mayores valores en áreas de gramíneas, en la camada de 0- 5 cm. Al comparar el sistema convencional y cobertura de gramíneas, se observó una reducción de la humina siendo un 42 % en relación al sistema convencional y de 53% en relación a la cobertura de gramíneas. Ya los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos no presentaron alteraciones significativas de carbono entre os diferentes manejos empleados.

Al comparar tres usos de la tierra (bosque, cultivo de cacao y pasto) BARRETO *et al.* (2008) no encontraron diferencias significativas para el C orgánico; entre tanto, la distribución de las sustancias húmicas varió en función de los diferentes manejos y usos. La fracción humina fue predominante, teniendo valores más elevados en la superficie del pasto. En el bosque, los ácidos húmicos aumentaron de acuerdo a la profundidad, teniendo comportamiento diferente en los otros usos. Los AF tuvieron aumento de acuerdo a la profundidad, excepto para el bosque. Los resultados de LEITE *et al.* (2003), muestran que la sustitución de bosque primario por cultivos anuales (maíz) causó reducciones de carbono de todas las fracciones húmicas.

2.6 Agregación del suelo

La literatura científica apunta diversas mejoras en el suelo debido a un buen estado de agregación, tales como mejor desarrollo radicular, aeración del suelo, protección contra procesos erosivos, almacenamiento de agua, entre otros. Para evaluar el grado de estructuración de un suelo y, por consiguiente, la calidad física del suelo, atributos como la textura, la materia orgánica, sustancias químicas, cantidad de carbono orgánico y microbiano, entre otros, han sido indicados.

La agregación es la unión de partículas, mediados por el carbono orgánico del suelo, arcilla y carbonatos, siendo la materia orgánica del suelo, al mismo tiempo, agente que influye en la formación y estabilidad de los agregados (BRONICK y LAL, 2005).

Según CASTRO FILHO *et al.* (1998), pueden ser utilizados como parámetros de evaluación del tamaño de los agregados y del estado de agregación del suelo: el Diámetro medio ponderado (DMP), y el Índice de estabilidad de los agregados (IEA), los cuales presentan un principio diferente. El DMP presenta mayores valores cuanto mayor sea el porcentaje de agregados retenidos en los tamices con mallas de diámetro mayor, y el IEA representa una medida de la agregación total del suelo, no considerando la distribución por clases de agregados, y cuanto mayor sea la cantidad de agregados de diámetro $<0,25$ mm, menor será el IEA.

CARPENEDO y MIELNICZUK (1990) afirman que suelos sometidos a cultivos intensivos tienden a perder la estructura original por el fraccionamiento de los agregados mayores en unidades menores, con consecuente reducción de los macroporos y aumento de los microporos y de la densidad. La magnitud de ocurrencia de estas alteraciones depende del tipo de suelo y de los sistemas de manejo utilizados, siendo el efecto más nocivo atribuido a los sistemas de manejo que promueven el revolvimiento intensivo del suelo, lo que afecta el contenido de materia orgánica del suelo.

LACERDA *et al.* (2005), analizaron la estabilidad de los agregados de un ultisol en diferentes sistemas de manejo como bosque, preparo convencional por diez años seguido de siembra directa por 12 años y preparo convencional por veintidós años, los autores constataron que la sustitución del preparo convencional seguido de siembra directa favoreció la estabilidad de los agregados, sin embargo las diferencias entre los índices de agregación no hayan sido significativas en la misma profundidad de las muestras del suelo.

CASTRO FILHO *et al.* (1998), obtuvieron diferencias significativas entre los índices de agregación en los sistemas de siembra convencional y directa, sobretudo en la profundidad 0–10 cm, los aumentos relativos propiciados por siembra directa fueron de 74% para el DMP, y de 10,4% para el IEA, y están directamente relacionados con el mayor acumulo de materia orgánica proporcionado por este sistema en relación al y preparo convencional.

2.7 Agregación del suelo y la materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo ejerce un papel de gran importancia en el proceso de formación y estabilidad de agregados de los suelos (WOHLEMBERG *et al.*, 2004; BRONICK y LAL, 2005; LOSS *et al.*, 2009). En este sentido, la estabilidad de los agregados depende del continuo fornecimiento de materia orgánica por los cultivos de manera suficiente para compensar la rápida pérdida del carbono orgánico del suelo (SIX *et al.*, 2000; BRONICK y LAL, 2005).

Existen relatos de la acción envolvente del carbono orgánico, en relación a la cantidad de la materia orgánica del suelo (CASTRO FILHO *et al.*, 1998). Además de eso, los suelos de regiones tropicales son sometidos a altas temperaturas y mayor descomposición, disminuyendo, de esa forma, el contenido de carbono orgánico y, consecuentemente, a la estabilidad de los agregados (BRONICK y LAL, 2005).

Fue demostrado que, entre los componentes de la materia orgánica del suelo, las sustancias húmicas poseen una mayor habilidad relativa para promover la formación de agregados estables (SWIFT, 1991). Trabajos realizados por STEVENSON (1982), BAYER y MIELNICZUK (1997) mostraron que la relación de la materia orgánica del suelo con la agregación puede ser evaluada por medio de las sustancias húmicas que la componen.

El efecto de las sustancias húmicas en la estabilidad de los agregados es

más duradero, ya que sufren una degradación biológica de menor intensidad (TISDALL y OADES, 1982). Varios estudios han evaluado el uso de materiales orgánicos para mejorar la agregación del suelo, ya que las sustancias húmicas, principalmente los ácidos húmicos, tienen efecto benéfico en la estabilidad de los agregados (TISDALL y OADES, 1982; LYNCH y BRAGG, 1985; FORTUN *et al.*, 1990; PICCOLO y MBAGWU, 1994).

Los sistemas de cultivo, generalmente, aumentan la oxidación de la materia orgánica del suelo, facilitando el ataque de microorganismos. Entre tanto, algunos manejos, como los conservacionistas, por ejemplo, posibilitan mayor protección y preservación de ese material orgánico, promoviendo, así, mayor estabilidad a los agregados (PASSOS *et al.*, 2007).

SALTON *et al.* (2008), evaluando la estabilidad de agregados en sistemas agropecuarios de Mato Grosso do Sul, corroboraron la idea de que la estabilidad de agregados mayores está íntimamente unida al contenido de carbono orgánico del suelo. Según estos autores, el aporte de carbono brinda un aumento en los agregados mayores del suelo, que pueden no ser estables. Por lo tanto, los agentes envolventes a los microorganismos, liberación de sustancias de las raíces, entre otros factores, garantizan mayor estabilidad a esas estructuras.

MENDES *et al.* (2003), comparando un suelo de vegetación primaria con el sistema de siembra directa y sistema convencional (PC) en un oxisols, estos

autores observaron mayor estabilidad de agregados en el manejo de vegetación primaria, siendo el PC el manejo con menor estabilidad de agregados. SILVA *et al.* (2008), evaluando las propiedades físicas de un oxisols en áreas de bosque primario y sistema de siembra directa por 2, 4 y 6 años, constataron que en la primera área hubo mayor cantidad de materia orgánica y, consecuentemente, mejor agregación del suelo.

OLIVEIRA *et al.* (2008), estudiando el comportamiento del IEA en áreas de bosque primario, pasto y cafetal (mecanizado y no-mecanizado), estos autores concluyeron que la magnitud de los efectos negativos causados por el uso del suelo en la agregación aumento en sentido de bosque-pasto-cafetal. Los valores de IEA encontrados para bosque primario fueron aproximadamente de 80% contra 77% en áreas de pasto y 67% en áreas de cafetal. Los valores del DMP también acompañaron el mismo sentido de decrecimos. Por tanto, las áreas con bosque primario, generalmente, tienen las mejores condiciones para el crecimiento y desarrollo de los vegetales. LIMA (2008) comentaron que la concentración de agregados de mayor tamaño en los ecosistemas de bosque se debe a la mayor cantidad de materia orgánica y de raíces, que contribuyen para la aproximación de las partículas del suelo.

ABIVEN *et al.* (2008), evaluando el efecto de la adición de material orgánico en suelos, los autores concluyeron que un control adecuado de la incorporación de materia orgánica del suelo, proporciona un aumento considerable en la estabilidad de agregados, reduciendo posibles procesos

erosivos. Por lo tanto, este aumento solo es posible si también fuera llevado en consideración, a la calidad y cantidad de ese material orgánico introducido.

Uno de los factores que influyen la agregación del suelo es el manejo que utiliza prácticas de rotación de cultivos. Estas prácticas pueden proporcionar variaciones en la agregación del suelo, de acuerdo con las especies utilizadas en el manejo (ANDRADE *et al.*, 2009). AMADO *et al.* (2005) describen, el continuo aporte de materia orgánica en la superficie en el sistema de siembra directa proporcionando mayor estabilidad de los agregados. VEIGA *et al.* (2009) también corroboraron el efecto de brinda la manutención de los restos culturales en el suelo, ya que la estabilidad de los agregados en la superficie del suelo aumenta. Estos autores aun asociaron la mayor estabilidad a una mayor cantidad de material orgánico en el suelo.

Existen numerosas investigaciones que atribuyen la formación y estabilidad de agregados a las plantas de cobertura. Generalmente, la agregación es atribuida a las características de las gramíneas y/o leguminosas. CAMPOS *et al.* (1999) y WOHLEMBERG *et al.* (2004) verificaron que la rotación de cultivos con la sucesión de gramíneas con leguminosas favorece la mayor agregación del suelo. Para CAMPOS *et al.* (1999) este proceso se debe al sistema radicular de la gramínea y a la descomposición de las leguminosas, creando un ambiente favorable a la agregación por la acción de las raíces, al fornecimiento de material orgánico y conservación de la humedad favorable a la acción de los microorganismos.

2.8 Factores que influyen en la estabilidad de agregados

La agregación del suelo está relacionada a diversos factores y procesos físicos, químicos y microbiológicos, fundamentales para la manutención, desenvolvimiento y equilibrio del manejo y uso del suelo.

De acuerdo con AZEVEDO y BONUMÁ (2004), la formación de los agregados del suelo depende de los factores que promueven la aproximación de las partículas primarias, y de los factores que mantienen las partículas unidas contra las fuerzas que tienden a separarlas. Los factores que promueven la aproximación de las partículas son: la floculación de las arcillas, proceso físico-químico dependiente del pH y de los cationes presentes en la solución del suelo y adsorbidos; procesos físicos como a deshidratación y la presión ejercida por las raíces; y los organismos del suelo. Según los referidos autores, los principales agentes que dan estabilidad a los agregados son: los minerales de arcilla, los óxidos de Fe y Al, y la materia orgánica, además de microorganismos, los cuales producen sustancias que actúan como agentes estabilizadores o funcionan como red envolviendo los agregados del suelo, como las hifas de los hongos asociadas a las pequeñas raíces.

Según BORGES *et al.* (2003), los factores que afectan la unión de moléculas a la formación de agregados, se pueden manifestar a través de procesos físicos (tales como los ciclos de humedecimiento y secado), productos químicos (tales como la precipitación de óxidos de Fe y Al) y biológicos (acción de las plantas y microorganismos).

El fundamento anterior concuerda con los resultados obtenidos por BASTOS *et al.* (2005), al estudiar la formación de agregados del suelo influenciados por ciclos de humedecimiento y secado, en la región de Viçosa/Brasil, los autores resaltaron que los principales factores que interfieren en la agregación del suelo, son: aspectos cualitativos y cuantitativos de arcilla, metales, carbonatos, óxidos e hidróxidos, exudados de plantas y demás complejos resultantes del metabolismo de microorganismos.

Dentro los factores biológicos que interfieren en la agregación del suelo, la biomasa y actividad de microorganismos pueden ser considerados de gran importancia. La comunidad microbiana presenta fuerte efecto agregante en función de los productos generados de sus metabolismos y del efecto físico con que las hifas de los hongos ejercen sobre las partículas del suelo, confiriendo mayor estabilidad a los agregados, mayor superficie de absorción de nutrientes, y mejor ambiente para el crecimiento de raíces.

La influencia de la materia orgánica en la agregación del suelo ocurre a medida que se adiciona material orgánico al suelo, intensificando la actividad microbiana, resultando en la producción de exudados que desempeñan función en la formación y estabilidad (agentes cementantes) de los agregados.

La utilización de áreas agrícolas y urbanas provoca alteración de la agregación y estabilidad de los agregados del suelo. Esa propiedad es considerada por algunos autores como importante indicador de calidad del

suelo, teniendo en vista el hecho de que, cuanto mayor la agregación y la estabilidad de éstos, mayor es la resistencia a la erosión hídrica (CHAVES y CALEGARI, 2001).

Los efectos del sistema de siembra directa en la agregación del suelo, por la eliminación de las operaciones de mecanización, resultan menor ruptura mecánica de los agregados y la mantención de la cobertura por residuos vegetales, protegiendo el impacto directo de las gotas de lluvia al suelo, condiciones bien diferentes de las encontradas en el sistema de preparo convencional (CARPENEDO y MIELNICZUK, 1990).

El mayor efecto agregante en el sistema de siembra directa, en comparación al PC en la camada superficial, fue relatado en diversos trabajos: CARPENEDO y MIELNICZUK (1990); LACERDA *et al.* (2005); WENDLING *et al.* (2005). Inúmeros trabajos relatan la acción de las raíces de las plantas en la formación y estabilidad de los agregados del suelo (TISDALL y OADES, 1982; SALTON *et al.*, 2008). CUNHA *et al.* (2001) observaron que la asociación de soya con brachiaria contribuyó para la estabilidad de los agregados.

Evaluando el efecto del tiempo de adopción en el sistema de siembra directa, CASTRO FILHO *et al.* (1998) observaron mayores porcentajes de agregados en la clase de mayor diámetro (>2,00 mm) con el tiempo de adopción en áreas de uno, seis y nueve años, con valores de 20.3%, 58.72% y 69.51%, respectivamente.

En el sistema de siembra directa, ocurre un aumento del DMP de los agregados del suelo, siendo ese aumento más acentuado en los primeros años de instalación del sistema (CAMPOS *et al.*, 1995). LACERDA *et al.* (2005) observaron que fue menor para el PC del suelo en relación al sistema de siembra directa con 12 años. WENDLING *et al.* (2005) observaron que el PC contribuyó para la disminución de los contenidos del carbono orgánico del suelo, menores valores del DMP, y menor porcentaje de agregados >2,00 mm; sin embargo la mayor agregación y aumento del contenido del C orgánico fueron observados en el sistema de siembra directa.

PERUSI (2005) afirma que los diferentes sistemas de uso y manejo del suelo influyen en la formación y estabilidad de sus agregados. El intenso revolvimiento de las capas superficiales, la mayor incorporación de la materia orgánica, el constante movimiento de implementos agrícolas y el pisoteo de los animales contribuyen para provocar alteraciones en la estructura del suelo, que promueven la alteración de otras propiedades, como la densidad y la porosidad, resultando en el comprometimiento de la capacidad productiva de este recurso natural. En esas condiciones, la calidad estructural del suelo pasa a ser una herramienta de evaluación de la sustentabilidad de sus sistemas de manejo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Caracterización del área de estudio

El presente estudio fue realizado en la ciudad de Jaboticabal, estado de São Paulo, en Brasil (Figura 6); cuyas coordenadas (UTM y geográficas) están presentes en la Cuadro 1, localizado a 595 m.s.n.m.

El suelo fue clasificado como un oxisols según la base de USDA Soil taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2006).

Cuadro 1. Coordenadas UTM y geográficas de los sistemas en estudio.

Sistemas	Coordenadas (UTM)		Coordenadas (Geográficas)	
	Norte (X)	Este (Y)	Latitud	longitud
Bosque	781124 m	7648174 m	21° 14´ 46.98´´ S	48° 17´ 28.70´´ W
Pasto	780693 m	7647490 m	21° 15´ 9.44´´ S	48° 17´ 43.23´´ W
SDD	781756 m	7648141 m	21° 14´ 47.70´´ S	48° 17´ 6.77´´ W
PC	781881 m	7646153 m	21° 14´ 47.26´´ S	48° 17´ 2.44´´ W

SDD = sistema de siembra directa con monocultivo maíz y con rotación soya/maíz, PC = sistema convencional.

El clima del lugar es del tipo Aw, tropical de invierno seco, conforme la clasificación climática de Köppen, con temperatura media anual de 22 °C y humedad relativa del aire de 70 %.

La precipitación anual media es de 1425 mm con distribución anual concentrada en el período de octubre-marzo y con relativa seca en el período de abril-septiembre.

Los sistemas de manejo evaluados fueron:

- a) Bosque (Figura 7), área sobre fragmentos de vegetación original, esta área fue escogida como referencia para la comparación de las alteraciones con los atributos estudiados;
- b) Pasto con *Brachiaria brizantha* (Figura 8), área con por lo menos 35 años de uso, manejadas con ganados, no teniendo un control de la cantidad de ganados, en esta área no hubo nunca corrección de acidez del suelo ni fertilización;
- c) Sistema de siembra convencional (aradora y niveladora por 35 años) (PC) con producción de granos (soya y maíz) (Figura 9);
- d) Sistema de siembra directa (SSD), con monocultivo de maíz (SDMM) y con rotación soya/maíz (SDSM) por 20 años desde 1991 (Figura 10). Antes de 1991 por 15 años, el área fue utilizada para producción de granos sobre PC. Sólo el SSD tuvo fertilización nitrogenada (N = 150 Kg/ha) en cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en verano, con rotación de cultivos, teniendo como leguminosas a la soja (*Glycine max* L. Merrill.) y gramínea al maíz en el invierno.

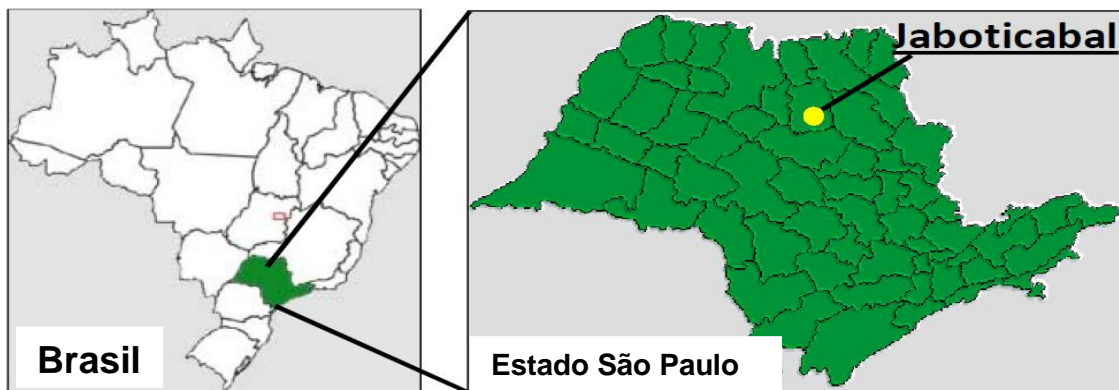


Figura 6. Localización de áreas estudiadas: 1) bosque; 2) pasto; 3) siembra directa con monocultivo de maíz (SDMM); 4) siembra directa con rotación soya/maíz (SDSM); 5) sistema convencional (PC).



Figura 7. Vista del área de bosque.



Figura 8. Vista del área de pasto.



Figura 9. Vista del área experimental de siembra convencional (PC).



Figura 10. Vista del área experimental del sistema de siembra directa (SSD), teniendo siembra directa con monocultivo de maíz (SDMM); y siembra directa con rotación soya/maíz (SDSM).

3.2 Materiales

3.2.1 Materiales del experimento

- Formatos de codificación y evaluación.
- Croquis del experimento.
- Cronometro digital.
- Agitador rotatorio de Wiegner a 60 rpm.
- Centrifuga de 5000 rpm
- Agitador horizontal de 150 rpm
- Plancha calefactora digital
- Maquina de oscilación vertical de Yoder.
- Tubo muestreador de suelos.
- Pipetas digitales.
- Balanza analítica.

3.2.2 Materiales complementarios

- Plumones indelebles y lápices.
- Bolsas transparentes de polietileno.
- Tamices de 6,30; 4,00; 2,00; 1,00; 0,5; 0,25; 0,125; 0,053 mm.
- 24 recipientes de vidrio de 500 ml
- 24 probetas de 1.000 ml.
- 24 capsulas de porcelana.
- 24 beckers de 10 ml.
- Termómetros.

- 2 disecadores.
- 150 latas de aluminio.
- 24 balones volumétricos de 25 ml.
- 24 balones volumétricos de 200 ml.
- 18 tubos de centrifuga de 60 ml.
- 4 L de NaOH de 0,1 mol L⁻¹.
- 500 ml de H₂SO₄.
- ½ Kg. de Na₂Cr₂O₇ a 0, 0667 mol L⁻¹.
- 4 Kg. de arena entre 1,0-0,5 mm.
- Agua destilada.
- Guantes.
- Cajas de cartón para identificación.
- Cámara fotográfica de 12.2 Megapixeles.

3.3 Metodología

3.3.1 Época de colecta del suelo

En inicios de junio del 2011, en cada sistema de manejo, fueron colectadas las muestras de suelo, según el tiempo de las cosechas realizadas en el SSD (después de la cosecha de maíz y antes del cultivo de soya) y en el PC la colecta de las muestras de suelo fue antes de la mecanización del suelo, en el bosque y pasto la colecta de las muestras fue en la misma fecha para no alterar la exactitud de los datos en el campo experimental de la hacienda de enseñanza e investigación de la Facultad de Ciencias Agrarias y Veterinarias de la UNESP, Campus de Jaboticabal, São Paulo, Brasil.

3.3.2 Colecta de muestras del suelo

Se colectaron 30 muestras al azar para todos los sistemas de manejo en la profundidad de 0-10 cm. La colecta en el sistema de siembra directa fue en la entrelínea de los cultivos, después de su siembra por mecanización en las líneas de cultivo; en el SDSM la colecta fue realizada una vez sembrada de soya (Figura 11) y en el PC fue antes de la mecanización del suelo, después de la cosecha de soya (Figura 12). Estas muestras colectadas fueron conducidas al laboratorio de Física de Suelos al Departamento de suelos y Abonos de la UNESP, Campus de Jaboticabal.

En los sistemas de manejo, las muestras de suelo fueron colectadas con ayuda de un azadón, para las determinaciones del diámetro medio ponderado (DMP) y el índice de estabilidad de agregados (IEA), y para las sustancias húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y humina), carbono orgánico total (COT), análisis químicas y granulométricas, las muestras de suelo fueron colectadas con ayuda de un muestreador de suelos.

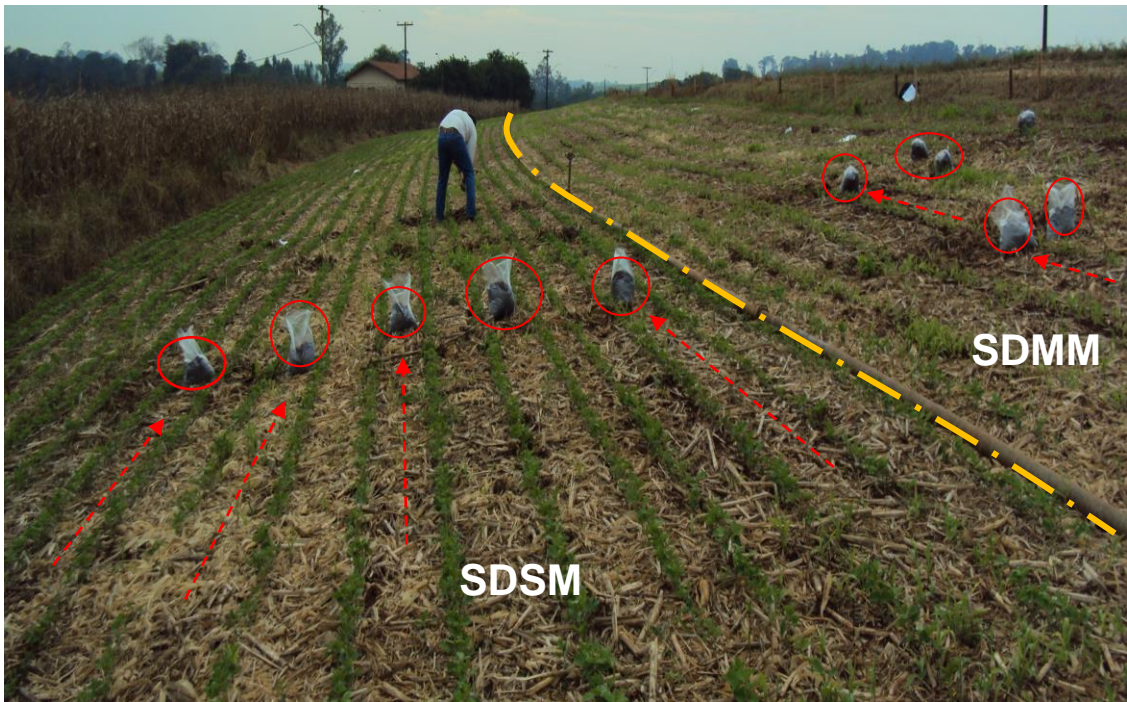


Figura 11. Colecta de muestras de suelo en las entrelineas del SSD, con monocultivo de maíz (SDMM) y con rotación soya/maíz (SDSM).



Figura 12. Colecta de muestras del suelo en el sistema convencional (PC).

3.4 Determinaciones

3.4.1 Preparación de las muestras del suelo

Una parte de las muestras del suelo (Figura 13) fueron, secadas al ambiente y pasadas por el tamiz de 2 mm, obteniéndose tierra fina seca al aire (TFSA); estas muestras fueron almacenadas en cajas identificadas de acuerdo al sistema de manejo (Figura 14). Las muestras de TFSA fueron posteriormente evaluadas para la caracterización del suelo.



Figura 13. a. Muestras colectadas en campo antes de su preparación, b. Secado de las muestras de suelo.

3.4.2 Análisis químicos y granulométricos

Los análisis químicos y granulométricos fueron realizados con el fin de saber sus características de fertilidad y textura, de cada sistema de manejo. Las muestras de suelo fueron enviadas al laboratorio de fertilidad y

física de suelos del departamento de suelos y abonos de la UNESP, Campus de Jaboticabal para ser analizados los siguientes atributos: pH (CaCl_2 0,01 mol L^{-1}), P (resina), K, Ca, Mg y acidez potencial (H+Al), conforme métodos propuestos por RAIJ et al. (2001). Con base en esas determinaciones fueron calculados la suma de bases (SB), capacidad de cambio de cationes (CCC) y la saturación por bases (V). Los resultados de los análisis químicos están presentes en el Cuadro 2.

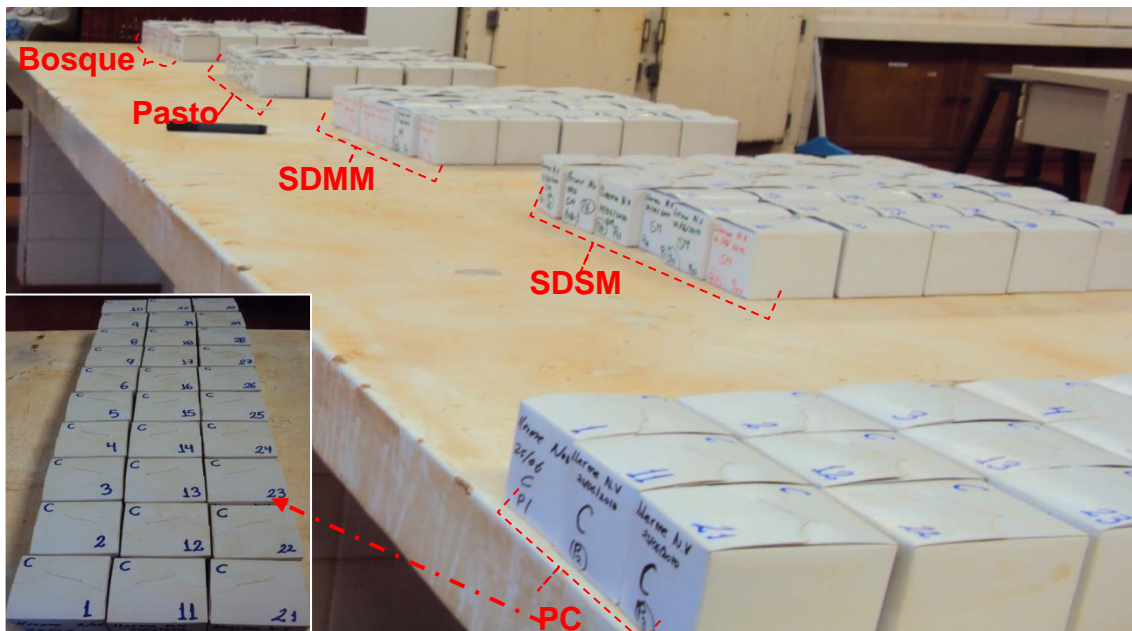


Figura 14. Identificación de las muestras de suelo: Siembra directa con monocultivo de maíz (SDMM), siembra directa con rotación soya/maíz (SDSM), sistema de siembra convencional (PC).

El análisis textural se realizó en recipientes de vidrio de 500 mL (Figura 15) se colocaron 10 g de TFSA, 10 mL de hidróxido de sodio (NaOH 1 mol L^{-1}), 100 mL agua destilada y 25 g de arena con diámetro entre 1,0-0,5 mm según el método propuesto por CORÁ *et al.* (2009). Los recipientes fueron acomodados en un agitador rotatorio de Wiegner a 60 rpm durante 16 h.



Figura 15. Agitador rotatorio de Wiegner, para análisis textural.

Después de la fase de dispersión mecánica (agitación), las muestras (conteniendo los recipientes de vidrio que fueron utilizadas para agitar) fueron pasadas en un tamiz de 0,053 mm de diámetro (Figura 16).



Figura 16. a. Separación de fracción de arena, b. Separación de la suspensión

El material retenido en el tamiz fue lavado para separar la fracción de arena, este material fue colocado en un bécquer, que fue llevado para secar a estufa (105 °C) por 24 h y, posteriormente, pesado (Figura 17).



Figura 17. a. Extracción de la fracción de arena, b. secado de la arena.

El restante de la suspensión, conteniendo las fracciones de limo y arcilla, fueron colocados en una probeta de 1.000 mL, completándose el volumen con agua destilada (Figura 18).

La suspensión fue homogenizada por 30 segundos para luego medir su temperatura, esta suspensión fue colocada en reposo (Figura 19) por un tiempo necesario para permitir la sedimentación de la fracción de arcilla.



Figura 18. Suspensiones de limo, arcilla (probetas) y la fracción de arena (beckers).



Figura 19. a. Agitación de la suspensión, b. medición de temperatura.

Después del tiempo de sedimentación calculado para separar la fracción arcilla, se extrajo una alícuota de 20 ml de la suspensión a 5 cm de profundidad a partir de la superficie (esta suspensión sería la sedimentación de limo), la cual se transfirió para una cápsula de porcelana previamente pesada e identificada, esta cápsula fue para estufa a 105-110 °C durante 24 h (Figura 20). El tiempo necesario para la sedimentación, fue calculado con base en la ley de Stokes, considerando la densidad de las partículas del suelo, determinada previamente, la temperatura de la suspensión.



Figura 20. a. Extracción de la fracción de arcilla, b y c. Transferencia de la fracción de arcilla, d. secado de la fracción de arcilla

Para la determinación de las fracciones granulométricas en las muestras del suelo, la fracción arcilla fue determinada por el método de la pipeta.

Para la fracción arena, se sustrajo, del valor obtenido por tamizado para aquella muestra, de la cantidad de arena adicionada en cada manejo del suelo. La fracción limo fue calculada por la diferencia de las demás fracciones ($\% \text{ limo} = 100 - (\% \text{ arcilla} + \% \text{ arena})$). El resultado final fue corregido en función al valor del agua de la muestra. Resultados de análisis granulométricos están presentes en el Cuadro 2.

3.4.3 Fraccionamiento químico de la materia orgánica del suelo

El resultado del fraccionamiento químico es la extracción de las sustancias húmicas, las cuales fueron extraídas de las muestras de TFSA de cada sistema de manejo, según el método de la Sociedad Internacional de las sustancias húmicas (IHSS) propuesto por SWIFT (1996) con base en la solubilidad diferencial en soluciones alcalinas y ácidas, de acuerdo a esta solubilidad fueron obtenidas las fracciones correspondientes a los ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y humina, los procedimientos de la metodología en el laboratorio son descritos a seguir:

3.4.3.1 Extracción de las sustancias húmicas

La primera extracción fue realizada en un tubo de agitación utilizando 4,0 g de TFSA, 40 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹, la suspensión (S) fue agitada durante 60 minutos a 150 rpm, en un agitador horizontal (Figura 21), después fue colocado en reposo por una noche, obteniendo un extracto alcalino (EA) que es formado por la fracción del ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e incluyendo el suelo.

Cuadro 2. Características químicas y granulométricas en los diferentes sistemas.

Atributos	Sistemas de manejo ⁽¹⁾				
	Bosque	Pasto	SDMM	SDSM	PC
Arena (g/kg de suelo)	228 (± 20)	118 (± 13)	133 (± 4)	135 (± 6)	108 (± 5)
Limo (g/kg de suelo)	141 (± 18)	201 (± 10)	211 (± 10)	205 (± 8)	233 (± 9)
Arcilla (g/kg de suelo)	631 (± 14)	681 (± 12)	657 (± 9)	660 (± 5)	659 (± 8)
pH (CaCl ₂)	5,8 (± 0,1)	4,9 (± 0,1)	5,9 (± 0,1)	5,9 (± 0,1)	5,5 (± 0,1)
P (resina) (mg dm ⁻³)	86,3 (± 49,4)	128,8 (± 32,6)	76,4 (± 6,9)	73,8 (± 9,7)	68,2 (± 11,3)
K ⁺ (mmol _c dm ⁻³)	4,5 (± 0,5)	7,4 (± 0,5)	5,6 (± 0,3)	5,0 (± 0,3)	5,2 (± 0,3)
Ca ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)	92,1 (± 10,0)	43,5 (± 5,1)	58,6 (± 1,8)	64,3 (± 2,6)	36,1 (± 1,2)
Mg ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)	25,4 (± 1,8)	29,6 (± 1,6)	22,8 (± 0,6)	23,8 (± 0,6)	15,4 (± 0,7)
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	29,5 (± 3,1)	67,3 (± 5,6)	19,5 (± 0,6)	21,9 (± 0,7)	28,0 (± 0,8)
SB (mmol _c dm ⁻³)	121,9(±10,1)	81,8 (± 5,6)	86,9 (± 2,3)	93,2 (± 3,0)	56,8 (± 1,9)
CCC (mmol _c dm ⁻³)	151,4 (± 9,1)	149,1 (± 6,9)	106,3 (± 2,1)	115,1 (± 2,6)	84,8 (± 1,9)
V (%)	80,0 (± 2,5)	54,9 (± 2,7)	81,5 (± 0,8)	80,9 (± 0,9)	66,9 (± 1,1)

⁽¹⁾: SDMM = sistema de siembra directa con monocultivo de maíz, SDSM = sistema de siembra directa con rotación soya/maíz, PC = sistema convencional. V= Saturación por bases, CCC= Capacidad de cambio de cationes. Los valores medios son presentados con el intervalo de confianza (P<0,05).

Al culminar el reposo (EA+S), fueron llevadas a centrifugación de 5000 rpm, durante 20 minutos, el sobrenadante fue transferido para un balón volumétrico. Esta operación de extracción fue repetida por 2 veces, por lo tanto las suspensiones siguientes fueron agitadas por 5 minutos a 150 rpm para después estar en reposo de una hora antes de entrar nuevamente a la centrifuga, teniendo la separación entre el EA y el residuo que viene a ser la humina (Figura 22).



Figura 21. a. y b. Proceso de agitación del extracto alcalino (EA) y el suelo (S).

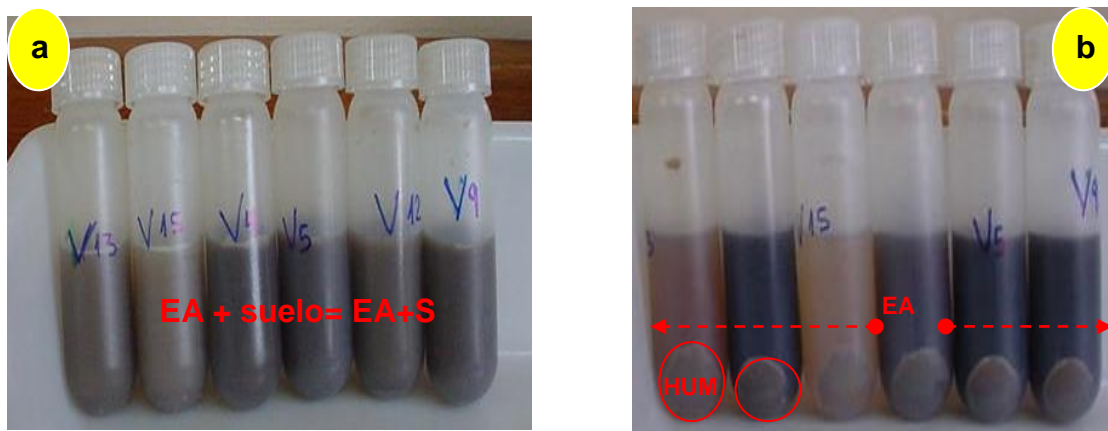


Figura 22. a. Proceso de centrifugación del EA+S, b. separación entre el EA y el residuo (humina).

Los extractos obtenidos en las centrifugaciones fueron juntados, resultando en un volumen final de 200 ml aproximadamente, ya que el volumen fue completado con agua destilada, después fueron transferidos para recipientes de vidrio identificados, estos recipientes estuvieron en refrigeración para su conservación (Figura 23). Parte del volumen obtenido de la separación del ácido húmico y utilizado para obtener el ácido fúlvico.



Figura 23. Extractos alcalinos de los diferentes sistemas de manejo.

3.4.3.2 Fracción de ácidos fúlvicos

El pH de 50 ml del EA fue ajustado a 2,0 con solución de H_2SO_4 concentrado, después estuvo en reposo por una noche. El precipitado (ácido húmico) fue separado de la fracción (ácido fúlvico) por centrifugación durante 10 minutos a 5000 rpm. El sobrenadante (ácido fúlvico) fue descartado y el precipitado (ácido húmico) fue guardado. Los valores del AF fueron obtenidos por la diferencia entre ácido húmico y el EA (Figura 24).



Figura 24. a. Ajuste del pH del EA, b. Separación del ácido fúlvico y húmico

3.4.3.3 Fracción de ácidos húmicos

Después de la obtención de la fracción de ácido fúlvico, 15 ml NaOH 0,1 mol L⁻¹ fueron adicionados al precipitado (ácido húmico), la fracción fue transferida para un balón volumétrico de 25 ml siendo el volumen fue completado con agua destilada (Figura 25).

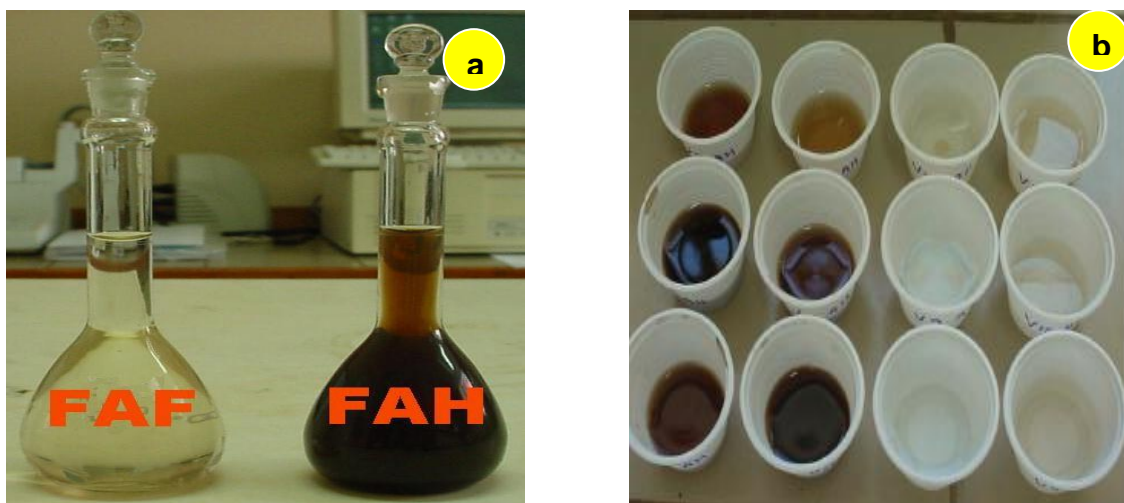


Figura 25. a. Fracciones del ácido fúlvico (FAF) y húmico (FAH), b. Muestras de las FAH (izquierda) y las FAF (derecha).

3.4.3.4 Fracción de humina

Los residuos que permanecieron en el tubo de centrifuga después de la extracción del EA fueron transferidos a latas de aluminio y secadas a 65 °C; después se molió el suelo (Figura 26).

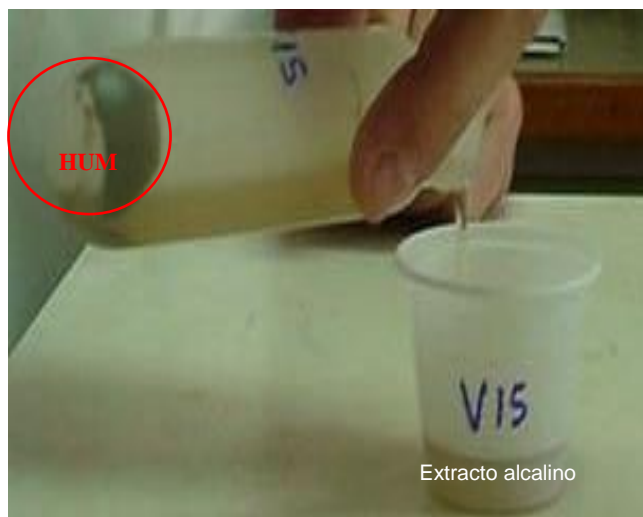


Figura 26. Obtención de la humina

3.4.3.5 Carbono orgánico total (COT) y humina

Conforme el “método Dakota do sul” modificado, y descrito en RAIJ et al. (1997). Este método consiste en la oxidación de la materia orgánica por el dicromato ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$), cuantificándola mediante un colorímetro a 650nm.

Consiste en pesar 1g de TFSA. Colocar dentro de un frasco cilíndrico de 150 ml, donde se adicionaron 10 ml de $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ a concentración de $0,0667 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 5 \text{ mol L}^{-1}$. Se agitó durante 10 minutos, a 180 rpm, en una máquina de agitación con movimiento circular

horizontal. Después de un reposo de 60 minutos, se adicionó 50 ml de agua destilada, promoviendo la combinación de las soluciones; se deja decantar durante toda una noche. Al día siguiente, se efectúa la lectura por medio de un colorímetro.

3.4.3.6 Cuantificación de las fracciones del ácido húmico

Fue conforme el “método Dakota do sul” modificado, y descrito en RAIJ et al. (1997), por ser muestra líquida se utilizó una alícuota de 4 ml de la fracción. Esta fracción líquida se colocó dentro de un erlenmeyer de 150 ml. A la vez también se adiciono por medio de un dispensador, 10 ml de la solución $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,0667mol/l en H_2SO_4 5 mol/l. Se agitó durante 10 minutos, a 180 rpm, en un agitador horizontal. Después de un reposo de 60 minutos, se adicionó 50 ml de agua destilada; se deja decantar durante toda una noche. Al día siguiente, se llevaron a una plancha calefactora digital durante 7 minutos a 100°C . Las muestras se dejaron enfriar a ambiente para realizar la lectura en el colorímetro.

3.5 Estabilidad de agregados en agua

3.5.1 Estabilidad de agregados con uso de múltiples tamices

Para esta evaluación, las muestras de suelo de cada sistema fueron manejadas con la misma humedad en que fueron obtenidas en el campo y secadas al aire por 24 h, para después ser tamizadas manualmente.

Estas muestras fueron pasadas en los tamices de 6,30 mm y

4 mm, los agregados que fueron retenidos en los de 4 mm, fueron secos a ambiente por 24 h (Figura 27), 10 g de estos agregados, fueron utilizados para la corrección de humedad de la muestra, siendo colocadas para estufa a 105 °C por 24 h y después pesadas.



Figura 27. Estabilidad de los agregados con uso de múltiples tamices: a y b.

Proceso de tamizado, c. Agregados entre 6,30–4,00 mm.

Otros 20 g de agregados con diámetros entre 6,30–4,00 mm fueron transferidos para un conjunto de tres tamices (Figura 28), la cantidad de agregados obtenidos en cada tamiz fue utilizado para el análisis de estabilidad de agregados en agua usando el método de YODER (1936), equipado con un conjunto de seis tamices con aberturas de 4,00 mm; 2,00 mm; 1,00 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; y 0,125 mm. Los análisis de cada muestra fueron realizadas por triplicado.

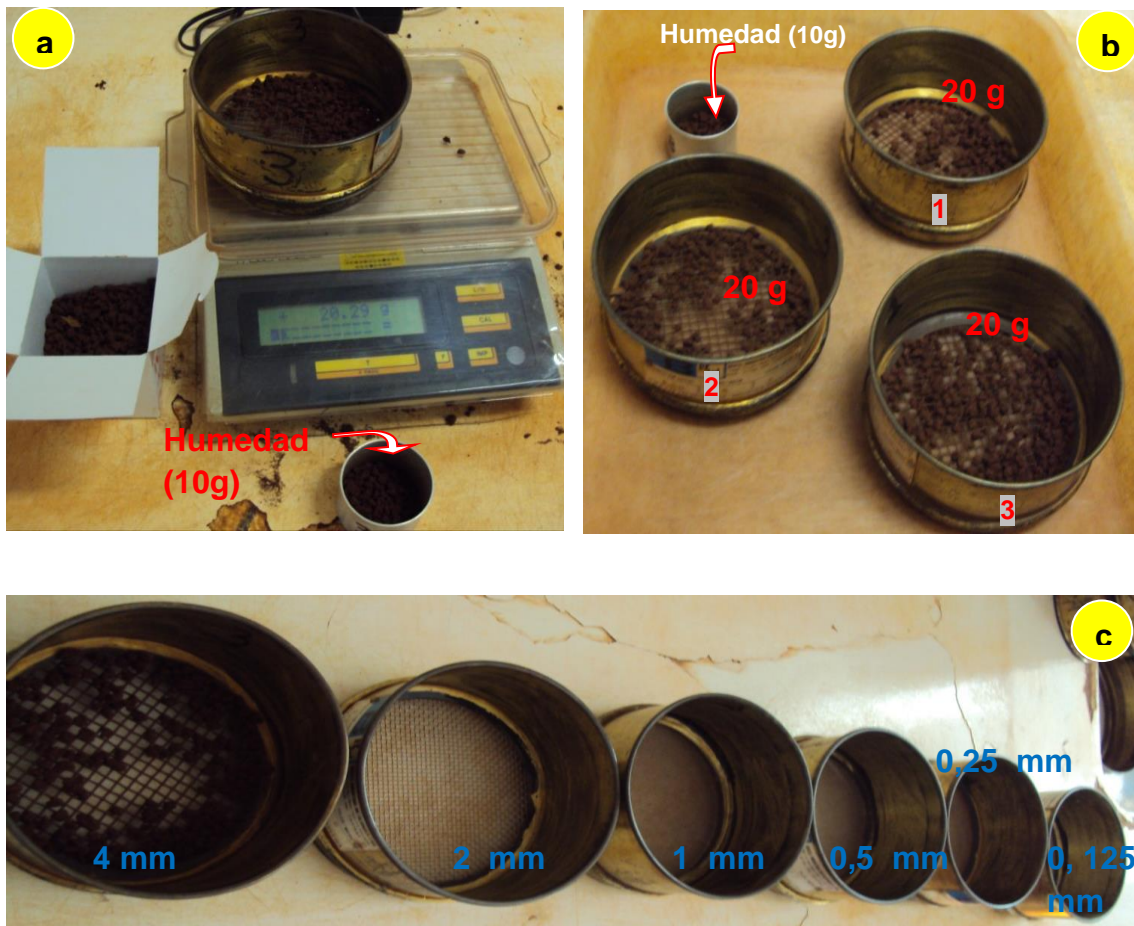


Figura 28. a y b. Pesaje de agregados entre 6,30–4,00 mm, c. Conjunto de tamices.

El juego de tamices con los agregados fueron colocadas en la máquina para oscilación vertical directamente inmersos en agua (YODER, 1936), el nivel de agua en la maquina fue ajustada en la posición más alta de los tamices, para que el agua cubra apenas el fondo del tamiz de 4 mm, la inmersión fue durante 15 min, ajustado para 31 ciclos min^{-1} , con amplitud de oscilación de 35 mm (Figura 29), la masa del material retenido en cada tamiz, fueron transferidos para latas de aluminio previamente taradas, colocadas para estufa a 105 °C (Figura 30).

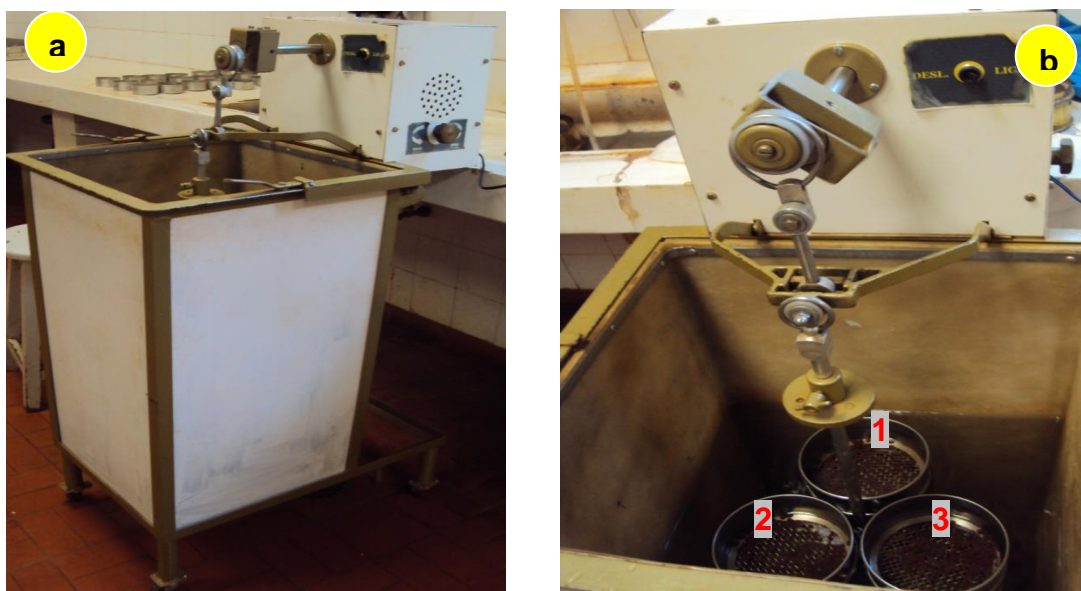


Figura 29. a y b. Máquina para oscilación vertical,

Para la determinación de arena, todas las muestras retenidas en cada tamiz (0,25mm y 0,125 mm) fueron transferidas para frascos de vidrio de 500 ml, para la dispersión lenta en un agitador rotatorio de Wiegner, a 60 rpm, por 16 h, usando 100 mL de NaOH 0,1 mol L^{-1} (Figura 31).

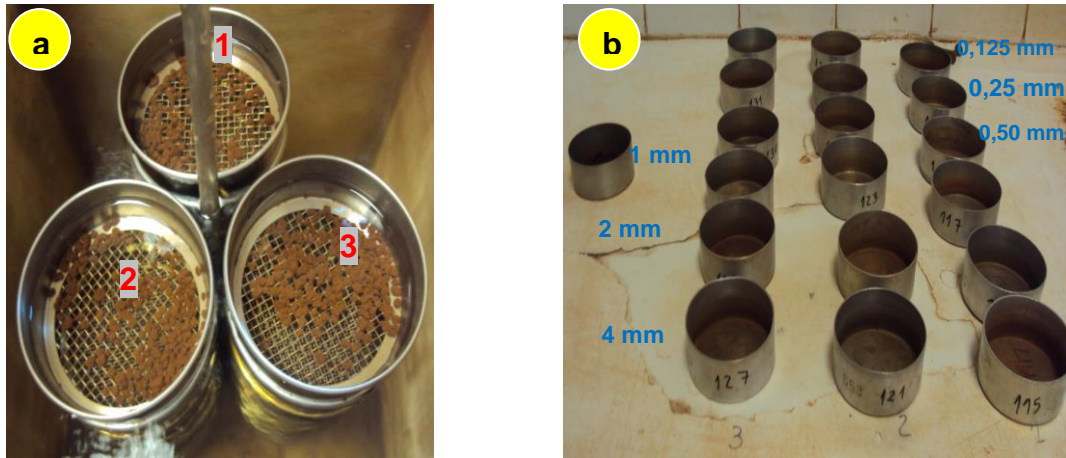


Figura 30. a. Juegos con tamices, b. Codificación en las clases de tamices.

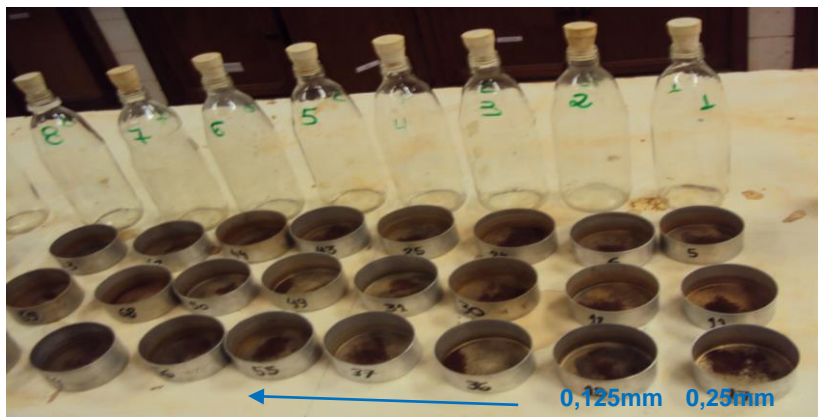


Figura 31. Sustracción de las cantidades de arena.

Posteriormente, los materiales retenidos en estos tamices fueron transferidos para latas de aluminio previamente taradas, llevados para estufa a 105 °C por 24 h y pesados (Figura 31). Con los datos del peso de los agregados retenidos en cada tamiz, la humedad de las muestras y el contenido de arena, se calculó la proporción de agregados estables en agua.

Los valores obtenidos fueron utilizados para el cálculo del diámetro medio ponderado (DMP) con los procedimientos descritos por KEMPER y ROSENAU (1986), de la siguiente manera, ecuación 1:

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) , \quad (1)$$

Donde:

X_i = diámetro medio de cada fracción retenida en el tamiz (mm);

W_i = proporción de cada clase en relación al total (no es en gramos y ni en %).

3.5.2 Estabilidad de los agregados con el uso de un único tamiz

En este método, las muestras colectadas en el campo fueron secas a temperatura ambiente por 24 h y para luego ser tamizadas. Los agregados que pasaron por el tamiz con abertura de 2,00 mm y que serán retenidos en el tamiz con abertura de 1,00 mm fueron utilizados para el análisis de estabilidad de agregados en agua (Figura 32).



Figura 32. Estabilidad de los agregados con uso de un único tamiz.

De estas muestras, se utilizó 4 g que fue pesada y transferida para un tamiz con abertura de 0,25 mm. El nivel de agua en la maquina fue ajustado a la posición más alta del tamiz, para que el agua cubra apenas el fondo del tamiz de 0,25mm. Ese tamiz con los agregados fueron directamente inmersos en agua en la máquina de oscilación vertical (YODER, 1936), siendo, ajustado para 35 ciclos min^{-1} , con amplitud de oscilación de 1,3 cm, durante 3 min (Figura 33).

Después del análisis, los agregados que fueron retenidos en el tamiz con abertura de 0,25 mm fueron transferidos para latas de aluminio. Posteriormente, las latas con los agregados fueron llevados a estufa a 105 °C por 24 h (Figura 34). También fue realizada la corrección de humedad y de arena >0,25 mm, utilizando 10 g de estos agregados que fueron secados en estufa a 105 °C por 24 h, para después ser pesados.

Con los datos de la masa de agregados retenidos en el tamiz con abertura de 0,25 mm y la masa de arena >0,25 mm, se calculó el índice de estabilidad de agregados (IEA), en porcentaje, descrito por KEMPER (1965), de la siguiente manera, ecuación 2:

$$\text{IEA} = 100 \times \frac{(\text{masa de agregados} > 0,25 \text{ mm}) - (\text{masa de arena} > 0,25 \text{ mm})}{(\text{masa de la muestra seca}) - (\text{masa de arena} > 0,25 \text{ mm})} \quad (2)$$

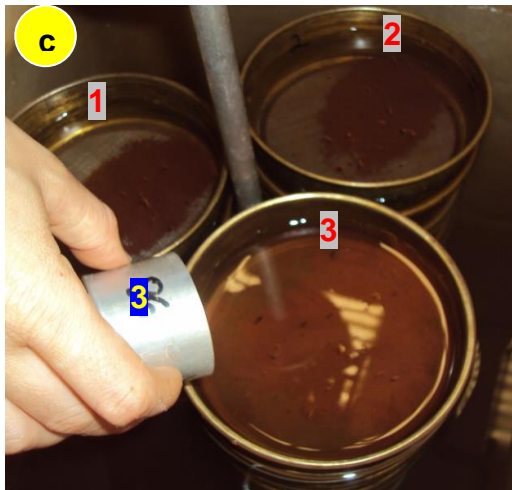


Figura 33. a. Codificación de las muestras en relación a los tamices, b y c. Posicionamiento y transferencia de los agregados, d. Oscilación de los agregados.

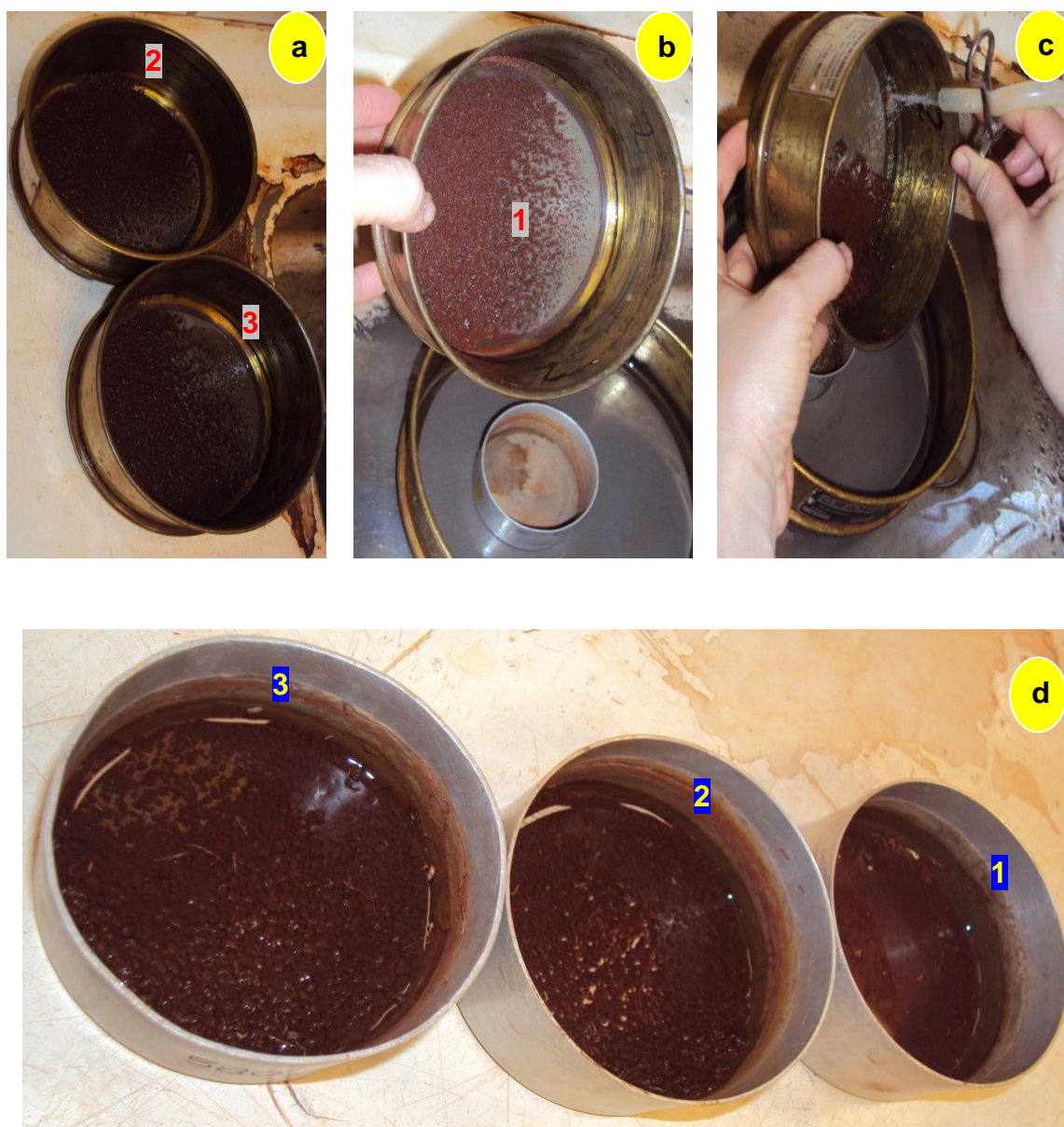


Figura 34. a, b, c. y d. Proceso de obtención del material retenido en el tamiz 0,25 mm,

3.6 Análisis estadístico

Los datos del contenido de C orgánico total (COT), de las fracciones húmicas (C-AF, C-AH, C-HUM), y de agregación del suelo (DMP y IEA) fueron analizados estadísticamente, las medias fueron comparadas por la prueba de t,

a 5% de probabilidad. Cada situación de manejo del suelo fue considerada como una muestra al azar, con 30 (muestras del suelo). Separadamente para cada situación de manejo del suelo, se realizó el análisis de correlación de Pearson ($P < 0,05$) realizadas entre los atributos químicos con los valores del carbono orgánico del suelo y los índices de agregación y, entre los índices de agregación y los valores del carbono orgánico del suelo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Carbono orgánico y las sustancias húmicas en el suelo

El suelo de pasto presentó valores de carbono orgánico total (COT) y de ácidos húmicos (C-AH) semejantes al suelo de bosque (Cuadro 3), siendo este sistema de manejo utilizado como referencia en el presente estudio. El sistema de manejo con pasto superó al bosque en cuanto a los valores de carbono orgánico en la fracción humina (C-HUM), por lo tanto, se observó resultado contrario en los valores del carbono orgánico de los ácidos fúlvicos (C-AF). El sistema con pasto fue el que presentó una condición más próxima al suelo de bosque, indicando mayor capacidad de recuperación del carbono orgánico del suelo en relación a los demás sistemas de manejo, con cultivos anuales (SDMM, SDSM y PC). Para ROSCOE *et al.* (2006), los pastos pueden acumular carbono orgánico de modo que superan los valores de carbono orgánico de un suelo sobre vegetación nativa.

El suelo con pasto presentó mayores valores de COT, C-HUM y C-AF en relación a los sistemas de manejo con cultivos anuales (SDMM y SDSM) y al sistema convencional (PC). Las gramíneas que componen los pastos, debido a su sistema radicular permanente en el suelo, contribuyeron en elevar los valores de carbono orgánico en el suelo en una forma más constante. El sistema radicular de las gramíneas con pasto explora con un mayor volumen al suelo en relación a los cultivos anuales, las cuales su sistema radicular permanece en un menor período en el suelo (menor ciclo). BARRETO *et al.*

(2008), al comparar tres sistemas de uso en un oxisols en una cuenca del sur del estado de Bahía en Brasil (Bosque, cultivo de cacao y pasto), observaron que el pasto proporciono los mayores valores de C-HUM, fracción que predomino entre las sustancias húmicas. Los autores atribuyeron que estos resultados se deben al efecto de las gramíneas que contribuyen para elevar y mantener los aportes de carbono en el suelo, así como su sistema radicular, indicando mayor estabilidad del carbono por el aumento en la C-HUM.

Cuadro 3. Cantidad del carbono orgánico del suelo (COS) en las fracciones húmicas del suelo sobre diferentes sistemas.

Sistemas ⁽²⁾	Carbono orgánico del suelo ⁽¹⁾			
	C-AH	C-AF	C-HUM	COT
	----- g/kg -----			
Bosque	3,26 (±0,25) b	12,11 (±0,89) a	20,73 (±0,64) b	36,71 (±3,25) a
Pasto	3,52 (±0,15) b	10,82 (±0,24) b	24,79 (±0,22) a	39,06 (±1,19) a
SDMM	4,68 (±0,28) a	2,10 (±0,17) d	10,43 (±0,16) c	17,28 (±0,23) b
SDSM	4,79 (±0,25) a	1,82 (±0,17) d	9,08 (±0,18) d	15,75 (±0,35) c
PC	2,36 (±0,25) c	3,38 (±0,39) c	6,84 (±0,20) e	12,61 (±0,22) d

⁽¹⁾: C-AH = C orgánico del ácido húmico, C-AF = C orgánico del ácido fúlvico, C-HUM = C orgánico de la humina. COT = C orgánico total del suelo, ⁽²⁾: SDMM = sistema de siembra directa con monocultivo de maíz, SDSM = sistema de siembra directa con rotación de soja/maíz, PC = sistema convencional. Medias seguidas de la misma letra en la columna no difieren entre sí por la prueba de t a (P<0,05).

Los valores de COT, C-HUM y C-AF en los suelos sobre SDMM, SDSM y PC fueron inferiores observados en el suelo de bosque (Cuadro 3). Esos resultados indican que los valores decrecieron en 35 años sobre exploración agrícola (SSD y PC) en relación al valor del carbono en el suelo a los niveles iniciales representados por los valores de carbono en el suelo sobre bosque, debido a las constantes perturbaciones del suelo, oriundas de las prácticas de

manejo. Son varios los trabajos que observaron mayores valores de carbono orgánico en el suelo sobre vegetación nativa en relación a los sistemas de manejo con cultivos anuales (JAKELAITIS *et al.*, 2008; PÔRTO *et al.*, 2009), y los resultados son atribuidos, principalmente, a la ausencia de perturbación del suelo en condiciones naturales y también por la mayor cobertura del suelo proporcionada por la hojarasca presente en el bosque. LEITE *et al.* (2003) observaron disminución de los estoques de carbono orgánico total y sus fracciones húmicas del suelo cuando convirtieron un bosque primario en sistemas de cultivos anuales de maíz en la región de la zona del bosque minero.

El sistema sobre PC presentó los menores valores de COT, C-HUM y C-AH en relación a los demás sistemas de manejo (Cuadro 3), esto se debe al mayor revolvimiento del suelo sobre el PC. El revolvimiento del suelo promueve la mayor aeración en el ambiente del suelo, favoreciendo la oxidación de la materia orgánica. Además de eso, hay la ruptura de los agregados del suelo con consecuente exposición de la materia orgánica del suelo a los microorganismos de compositores, favoreciendo mayores pérdidas de carbono. En tanto, los mayores valores de C-AF en relación a los valores del suelo sobre SDMM y SDSM, pueden ser atribuidos a la transformación de las mayores moléculas húmicas, como C-HUM y C-AH en C-AF, debido al revolvimiento del suelo, que puede haber proporcionado la ruptura de las sustancias húmicas en moléculas menores. Resultados semejantes fueron obtenidos por CUNHA *et al.* (2001), al estudiar el impacto del PC del suelo en un oxisols. Los autores

observaron que la preparación del suelo proporcione aumento de los C-AF y disminución de C-AH.

Fueron observados los mayores valores de COT y C-HUM en el suelo sobre SDMM, cuando comparado al SDSM (Cuadro 3), estos resultados pueden ser relacionados a la mayor contribución de los residuos de maíz en la humificación del carbono en el suelo, en relación a los residuos de soya. El SDMM envuelve dos cultivos de maíz al año, lo que no ocurre en el SDSM, siendo un cultivo de maíz y otro de soya, ya que luego de un ciclo de cultivo, los cambios en la calidad del suelo por introducción de leguminosa de cobertura al cultivo del maíz, son evidentes en la calidad de la materia orgánica del suelo, debido a que existen indicadores de la descomposición de materia orgánica del suelo como lignina, polifenoles y la relación de C/N.

Según MARTENS (2000), los residuos de maíz presentan mayores contenidos de lignina y compuestos fenólicos en relación a los residuos de soya, estos compuestos, presentan la acción de los microorganismos en el proceso de polimerización, formando los principales componentes del húmus (STEVENSON, 1994). Por tanto, hubo mayor contribución del sistema sobre el SDMM en la formación de sustancias húmicas, en relación al SDSM. Resultado semejante fue observado por MARCELO (2011), al estudiar el efecto de la composición de los residuos vegetales en el SSD sobre el contenido del carbono orgánico del suelo. El autor también atribuye las características de los residuos de maíz en la formación de sustancias humificadas.

En general, se observó predominio del C-HUM en el suelo en relación a las fracciones de C-AH y C-AF, en todos los sistemas de manejo evaluados, indicando mayor grado de humificación del C en el suelo (STEVENSON, 1994).

4.2 Agregación del suelo

El sistema de manejo sobre pasto proporciona al suelo agregados con mayores tamaños de aquellos observados sobre suelo de bosque (Cuadro 4).

Cuadro 4. Diámetro medio ponderado (DMP) de agregados estables y el índice de estabilidad de agregados (IEA) del suelo, en diferentes sistemas.

Sistemas ⁽¹⁾	Índices de agregación	
	DMP (mm)	IEA (%)
Bosque	4,73 (\pm 0,11) b	96,10 (\pm 1,18) b
Pasto	4,94 (\pm 0,11) a	97,63 (\pm 0,70) ab
SDMM	4,75 (\pm 0,06) ab	98,07 (\pm 0,32) a
SDSM	4,46 (\pm 0,09) c	94,45 (\pm 0,51) bc
PC	1,91 (\pm 0,12) d	77,61 (\pm 1,84) d

⁽¹⁾: SDMM = sistema de siembra directa con monocultivo de maíz, SDSM = sistema de siembra directa con rotación de soja/maíz, PC = sistema convencional. Medias seguidas de la misma letra en la columna no difieren entre sí por la prueba de t a ($P < 0,05$).

Los agregados del suelo sobre pasto presentaron superiores valores de DMP en relación a los sistemas de manejo con cultivo anual (SDSM y PC). Esos resultados indican que el proceso de agregación es gobernado principalmente por la acción mecánica de las raíces (FONTANA *et al.*, 2005), aliado a la humificación de los compuestos fácilmente hidrolizables presentes en los residuos vegetales de las raíces de las plantas (LIU *et al.*, 2005). Por lo tanto, el mayor tamaño de los agregados del suelo sobre el pasto se debe

probablemente a la mayor acción del sistema radicular de las gramíneas utilizadas en el pasto y a la mayor distribución de plantas en el suelo sobre pasto en relación al suelo sobre sistemas con cultivos de soya y maíz (sembradas en líneas).

Resultados semejantes fueron obtenidos por SALTON *et al.* (2008), que estudiaron sistemas de manejo sobre la agregación del suelo en un oxisols en el estado de Mato Grosso do Sul-Brasil. Los autores concluyeron que los sistemas de manejo del suelo con pasto permanente o en rotación con labora-pecuaria favorecen la formación de agregados de mayor tamaño, en relación a los cultivos anuales, debido al mayor aporte de carbono orgánico al suelo vía sistema radicular, especialmente en la formación de macroagregados.

En los sistemas de pasto y SDMM fue verificado mayores valores de DMP de que en el bosque, también fueron constatados resultados semejantes en el IEA en estés sistemas de manejo ya mencionadas (Cuadro 4). Esos resultados muestran que en áreas sin revolvimiento constante del suelo como el pasto, el tamaño de los agregados es mayor. Los beneficios de sistemas sin revolvimiento del suelo basados como en el caso del pasto por ser perene es más eficiente para la agregación, que alcanzó tener un nivel de macroagregados muy próximo del bosque, ya habían sido destacados por VEZZANI y MIELNICZUK (2011), los cuales también atribuyeron a las causas de esos beneficios a la acción más eficaz del sistema radicular e hifas de hongos asociados de las gramíneas, especialmente a las gramíneas perennes al ser probablemente, el principal agente

cimentante, pues el contenido de carbono orgánico se sitúa en un lugar inferior al de los sistemas del grupo sin revolvimiento del suelo.

Las mayores contribuciones de los residuos de maíz del sistema SDMM en relación al SDSM en la formación de sustancias humificadas en el suelo (COT y C-HUM, Cuadro 3) hayan favorecido la agregación del suelo (Cuadro 4), resultando la formación de agregados estables con tamaño superior, debido a la acción cimentante de la materia orgánica del suelo, representada por las sustancias húmicas. Resultados semejantes fueron observados por MARTINS *et al.* (2009), al estudiar el efecto de secuencias de cultivos en la agregación del suelo, C orgánico y polisacáridos en diferentes clases de agregados estables en agua de un oxisols sobre el SSD. Los autores observaron que la monocultivo de maíz proporciono mayores valores del COT, polisacáridos y mayor estabilidad de agregados del suelo. Estos autores atribuyeron al resultado la acción de las raíces y de los residuos del maíz, las cuales liberan un mucilago al suelos, contribuyendo en la formación y estabilidad de los agregados en el suelo. Los autores observaron que la agregación del suelo fue intermediada, principalmente, por los valores del carbono orgánico y por los polisacáridos del suelo.

De modo general, los suelos del bosque, pasto, SDMM y SDSM, presentaron elevados índices de estabilidad de agregados (IEA) (superiores a 90%) (Cuadro 4). En tanto, el suelo sobre el PC presento el menor valor del IEA (inferior a 80%). El sistema de PC también presento el menor valor de DMP. La menor agregación del suelo sobre el PC es atribuida a los menores valores del

carbono orgánico del suelo, proporcionados por el revolvimiento periódico del suelo, que provoca la ruptura de los agregados presentes del suelo e intensifica el proceso de mineralización de los compuestos orgánicos del suelo, desfavoreciendo la formación y la estabilidad de los agregados del suelo. CASTRO FILHO *et al.*, (1998) observaron menores valores de IEA en el PC en relación al SSD, además estos autores relacionaron el resultado a la menor agregación del suelo y al menor acumulo de carbono orgánico proporcionado por el PC.

Además de eso, la ausencia de cobertura del suelo por los residuos vegetales en el sistema PC permite la destrucción de los agregados del suelo por el impacto directo de las gotas de lluvia sobre los agregados del suelo y también a la mayor incidencia de radiación en la superficie del suelo, favoreciendo la oxidación de carbono en el suelo (WOHLEMBERG *et al.*, 2004).

Fue observado el efecto del orden del suelo Oxisols en la estabilidad de los agregados, debido a las grandes cantidades apreciables presentes en estos suelos: los óxidos de hierro asociados al hidróxido de aluminio sobre la agregación de las partículas del suelo, ya que actúan como agentes cementantes entre las partículas de arcilla física. Corroborando los resultados de RAIJ *et al.* (2001), la gran estabilidad de los agregados es debido a la naturaleza de la arcilla y minerales características de este tipo de suelo.

4.3 Relaciones entre los atributos químicos, el carbono orgánico del suelo y la agregación del suelo

En el suelo de bosque, el COT y C-HUM proporcionó mayores valores de CCC al suelo, resultando mayores valores de Ca^{2+} , SB, V (Cuadro 5). Resultados semejantes fueron por CANELLAS *et al.* (2003), al trabajar con suelos sobre diferentes manejos, observaron correlación entre CCC y los valores totales del carbono orgánico. Según RAIJ (1981), la estimativa de la contribución de la materia orgánica en generar de cargas en suelos de regiones tropicales varía entre 56 y 82% de CCC.

En el sistema de manejo del bosque, los mayores valores de C-AF fueron observados en condiciones de mayor acidez, o sea, con menores valores de pH (CaCl_2), V y mayores valores de H+Al. En condición de mayor fertilidad, el bosque presento mayores valores de CCC, V, pH (CaCl_2), Ca^{2+} y SB, se observaron mayores valores de DMP e IEA (Cuadro 6).

El suelo sobre pasto, presento los menores valores de pH (CaCl_2) y V entre los sistemas de manejo (Cuadro 2), se observó solamente la contribución del COT en generar cargas negativas del suelo y también en el CCC del suelo (Cuadro 5).

En el suelo sobre PC, se observó la influencia de los valores de C-HUM en el aumento de los valores de SB y CCC. En el suelo sobre pasto y PC, no fueron observados correlaciones significativas entre los atributos químicos y los índices de agregación del suelo (Cuadro 6).

Cuadro 5. Coeficientes de correlación entre los atributos químicos y el carbono orgánico del suelo (COS), sobre diferentes sistemas.

Sistemas ⁽¹⁾	COS ⁽²⁾	Parámetros ⁽³⁾					
		pH	Ca	H+Al	SB	CCC	V
Bosque	C-AH	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	C-AF	-0,47***	ns	0,57***	ns	ns	-0,53***
	C-HUM	0,40**	0,35*	ns	0,40**	0,35*	0,46**
	COT	ns	0,73***	ns	0,75***	0,84***	0,38**
Pasto	C-AH	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	C-FAF	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	C-HUM	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	COT	ns	ns	0,31*	ns	0,37**	ns
SDMM	C-AH	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	C-AF	ns	0,25*	ns	0,23*	0,22*	ns
	C-HUM	ns	ns	ns	ns	-0,22*	ns
	COT	ns	0,27**	ns	0,27**	0,32**	ns
SDSM	C-AH	0,23*	ns	ns	ns	ns	ns
	C-AF	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	C-HUM	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	COT	0,29**	ns	ns	ns	ns	ns
PC	C-AH	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	C-AF	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	C-HUM	ns	ns	ns	0,34*	0,42**	ns
	COT	ns	ns	ns	ns	ns	ns

⁽¹⁾:SDMM = sistema de siembra directa con monocultivo de maíz, SDSM = sistema de siembra directa con rotación de soja/maíz, PC = sistema convencional, ⁽²⁾ :C-AH = C orgánico del ácido húmico, C-AF = C orgánico del ácido fúlvico, C-HUM = C orgánico de la humina. COT = C orgánico total del suelo, ⁽³⁾: SB = Suma de bases, CCC= capacidad de cambio de cationes, V =Saturación por bases. * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$;*** $P \leq 0,001$; ns: no significativo.

Suelos con SDMM y SDSM, se observaron correlaciones positivas entre los valores de COT y C-AF con los valores de Ca^{2+} , SB y CTC, y negativa entre los valores de C-HUM y CCC (Cuadro 5). Ya en el SDMM, los mayores valores de DMP fueron observados en condiciones de mayor CCC (Cuadro 6).

Cuadro 6. Coeficientes de correlación del diámetro medio ponderado (DMP) e índice de estabilidad de agregados (IEA) vs. Los parámetros químicos, sobre diferentes sistemas.

Sistemas ⁽¹⁾	Índices de agregación	Parámetros ⁽³⁾					
		pH	Ca	H+Al	SB	CCC	V
Bosque	DMP	0,41**	0,65***	ns	0,63***	0,60***	0,57***
	IEA	0,42**	0,53***	-0,33*	0,53***	0,47***	0,56***
Pasto	DMP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	IEA	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SDMM	DMP	ns	ns	ns	ns	0,22*	ns
	IEA	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SDSM	DMP	0,22*	ns	-0,22*	ns	ns	ns
	IEA	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PC	DMP	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	IEA	ns	ns	ns	ns	ns	ns

⁽¹⁾:SDMM = sistema de siembra directa con monocultivo de maíz, SDSM = sistema de siembra directa con rotación de soja/maíz, PC = sistema convencional, ⁽²⁾:SB = Suma de bases, CCC= capacidad de cambio de cationes, V =Saturación por bases. * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$;*** $P \leq 0,001$; ns: no significativo.

En el suelo sobre SDSM, los valores de COT y C-AH se correlacionaron positivamente con los valores de pH (CaCl₂) (Cuadro 5) y, los valores de pH (CaCl₂) y de H+Al se correlacionaron positiva y negativamente, con los valores de DMP del suelo, respectivamente (Cuadro 6).

El COT se correlacionó positivamente con la agregación del suelo (DMP e IEA) en todos los sistemas de manejo evaluados (Cuadro 7). Ese resultado

demuestra la acción cimentante del carbono orgánico en el proceso de agregación del suelo. Concordando con estos resultados, SPACCINNI *et al.* (2004) verificaron correlaciones positivas entre el DMP y los valores del COT en un Inceptisols y en un Ultisols en Nigeria.

Varias investigaciones indican que el carbono orgánico es fundamental en la agregación y estabilidad de los agregados en el suelo (WENDLING *et al.*, 2005; FERREIRA *et al.*, 2007). Según CASTRO FILHO *et al.* (1998), correlaciones positivas entre el carbono orgánico y la agregación del suelo, es debido a que el carbono es un eficiente agente de formación y estabilidad de los agregados.

El COT se correlacionó positivamente con la agregación del suelo (DMP e IEA) (Cuadro 7). Ese resultado demuestra la acción cimentante del carbono orgánico en el proceso de agregación del suelo. Concordando con estos resultados, SPACCINNI *et al.* (2004) verificaron correlaciones positivas entre el DMP y COT en un Inceptisols y en un Ultisols en Nigeria. Varias investigaciones indican que el carbono es fundamental en la agregación y estabilidad de los agregados en el suelo (WENDLING *et al.*, 2005; FERREIRA *et al.*, 2007). Según CASTRO FILHO *et al.* (1998), correlaciones positivas entre el carbono orgánico y la agregación del suelo, es debido a que el carbono orgánico es un eficiente agente de formación y estabilidad de los agregados.

Cuadro 7. Coeficientes de correlación del carbono orgánico total (COT) y las fracciones húmicas con el diámetro medio ponderado (DMP) y el índice de estabilidad de agregados (IEA), sobre diferentes sistemas.

Sistemas ⁽¹⁾	Índices de agregación	COS ⁽²⁾			
		C-AH	C-AF	C-HUM	COT
Bosque	DMP	ns	-0,34*	0,54***	0,55***
	IEA	ns	-0,39**	0,49***	0,46**
Pasto	DMP	ns	ns	ns	0,58***
	IEA	ns	ns	ns	0,71***
SDMM	DMP	ns	ns	0,29**	0,60***
	IEA	ns	ns	0,22*	0,59***
SDSM	DMP	ns	0,36***	ns	0,49***
	IEA	ns	0,29**	ns	0,46***
PC	DMP	ns	ns	ns	0,53***
	IEA	ns	ns	ns	0,50***

⁽¹⁾:SDMM = sistema de siembra directa con monocultivo de maíz, SDSM = sistema de siembra directa con rotación de soja/maíz, PC = sistema convencional, ⁽²⁾ : COS= C orgánico del suelo, C-AH = C orgánico del ácido húmico, C-AF = C orgánico del ácido fúlvico, C-HUM = C orgánico de la humina. COT = C orgánico total del suelo. * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$;*** $P \leq 0,001$; ns: no significativo.

En el suelo de bosque, se observó correlación positiva entre la agregación del suelo y los del C-HUM, además de eso, se observó correlación negativa entre los índices de agregación del suelo y los del C-AF (Cuadro 7). Se observaron correlaciones positivas de la agregación del suelo entre C-HUM en el manejo de SDMM y, en el manejo con SDSM, con el C-AF. No fueron verificados resultados semejantes en las investigaciones de estas fracciones en las correlaciones entre los índices de agregación. Por lo tanto, investigaciones

son necesarias para esclarecer el papel del carbono orgánico del solo en la estabilidad de agregados de los suelos tropicales sometidos a diferentes manejos.

Los resultados del presente trabajo discuerdan del aquel concepto de jerarquía en los experimentos de OADES y WATERS (1991), que afirmaron que los oxisols no poseen jerarquía de agregados. Según AZEVEDO y BONUMÁ (2004), la alta estabilidad de agregados es frecuentemente atribuida a la gran cantidad de óxidos de fierro y aluminio presente en éstos suelos. Según FREY (2005), la jerarquía de agregación es más evidente en suelos de clima temperado de que en suelos tropicales, donde hay arcilla del tipo 1:1 y el ciclo más rápido de material orgánico en suelos, principalmente cuando cultivados. En el presente estudio, se observo la intermediación del COT y de sus fracciones en la estabilidad de agregados de un oxisols de textura muy arcillosa, demostrando su acción cimentante, posibles de ser alterados por factores como la influencia del manejo de suelo.

V. CONCLUSIONES

1. La conversión del bosque en pasto aumenta la cantidad de agregados de mayor tamaño, reflejados por el contenido del carbono orgánico total semejante en estas dos áreas.
2. El sistema convencional presentó los efectos más nocivos en su estructura del suelo, por la menor cantidad de índices de agregación, reflejados por los menores contenidos del carbono orgánico total, fracción de los ácidos húmicos y humina.
3. El sistema de siembra directa con monocultivo de maíz tendió a incrementar la fracción humina, carbono orgánico total, diámetro medio ponderado y el índice de estabilidad de agregados, en relación a los encontrados en el sistema de siembra directa con rotación de soya/maíz, el aumento es debido a la mayor contribución de los residuos de maíz, gracias a su rotación.
4. La mayor acción del sistema radicular y distribución de las plantas en el suelo fue encontrado en el sistema de pasto en relación a los sistemas (convencional y siembra directa), ya que influenció en la formación de agregados estables del suelo de mayor tamaño.
5. Los contenidos del carbono orgánico del suelo y los índices de agregación constituyen medidas promisoras para detectar cambios en la estabilidad de la materia orgánica del suelo, en función de su uso.

6. Fue observado el efecto del orden del suelo Oxisols sobre la estabilidad de los agregados debido a las características de este tipo de suelo, mediante los óxidos de hierro e hidróxidos de aluminio que actuaron como agentes cementantes entre las partículas de arcilla, teniendo así una fuerte influencia en la agregación de las partículas del suelo.

VI. RECOMENDACIONES

1. Realizar investigaciones sobre las fracciones húmicas (ácido húmico, ácido fúlvico y humina) y el carbono orgánico total entre los índices de agregación (diámetro medio ponderado y el índice de estabilidad de agregados) a la vez correlacionarlas.
2. Debe incluirse trabajar con otros órdenes de suelos.
3. Esclarecer el papel del carbono orgánico del suelo en la estabilidad de agregados de suelos tropicales sometidos a diferentes manejos.

VII. RESUMEN

Los sistemas de manejo alteran la calidad de los suelos, debido a la influencia de la cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo, las cuales pueden afectar la agregación del suelo. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el C orgánico del suelo, fracciones húmicas y la estabilidad de agregados del suelo en diferentes sistemas de manejo, siendo a las vez correlacionados. Los sistemas de manejo del suelo fueron: pasto (*Brachiaria brizantha*), sistema convencional (PC) y dos sistemas en siembra directa (SSD), uno con monocultivo de maíz (SDMM) y otro con rotación soya/maíz (SDSM), utilizando como referencia a un suelo de bosque. El área de estudio se localizo en Jaboticabal, São Paulo/Brasil, de un suelo oxisols. Muestras de suelo fueron colectadas a una profundidad de 0-0,10 cm, siendo analizadas el diámetro medio ponderado (DMP), índice de estabilidad (IEA) de los agregados, C orgánico total (COT), fracción de los ácidos fúlvicos (C-AF), ácidos húmicos (C-AH) y humina (C-HUM) del suelo. Fue observado el efecto del orden del suelo Oxisols sobre la estabilidad de los agregados debido a la naturaleza de la arcilla y minerales (óxidos de hierro e hidróxidos de aluminio). El sistema de pasto presento contenidos de COT y C-AH semejantes al sistema del bosque, además de eso, el C-HUM obtenido en pasto fue superior al obtenido del bosque. Los resultados mostraron que hubo semejanzas en los sistemas de pasto y SDMM con el incremento del C orgánico, donde los valores de DMP y IEA fueron significativamente superiores, en relación a SDSM y PC, esta agregación tendió a aumentar cuando la rotación de cultivos incluye gramínea (maíz). Se constató que el uso del solo disminuyó la

estabilidad de agregados, evidenciada por la reducción en el DMP, por el aumento de los agregados de menor tamaño y por los menores contenidos de C orgánico en el sistema de PC. Correlaciones significativas y positivas fueron obtenidas entre el COT y los índices de agregación (IEA y DMP) en todos los sistemas estudiados. Por lo tanto, la agregación del suelo fue gobernada principalmente por el COT del suelo. Los valores del C orgánico y los índices de agregación constituyen medidas promisoras para detectar cambios en la estabilidad de la materia orgánica del suelo, en función del manejo y uso.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. ABIVEN, S.; MENASSERI, S.; CHENU, C. 2008. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – a literature analysis. *Soil Biology y Biochemistry*, Oxford, UK. 41(1):1-12.
2. ALMEIDA, J.A.; BERTOL, I.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. 2005. Propriedades químicas de um Cambissolo Húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 29:437-445.
3. ALMEIDA, V.P.; ALVES, M.C.; SILVA, E.C.; OLIVEIRA, S.A. 2008. Rotação de culturas e propriedades físicas e químicas em Latossolo Vermelho de cerrado sob preparo convencional e semeadura direta em adoção. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 32:1227-1237.
4. AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. 2001. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 25(1):189-197.
5. AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.; LANZANOVA, M. 2005. A compactação pode comprometer os rendimentos de áreas sob plantio direto. *Revista Plantio Direto*, Passo Fundo, Brasil. 89:34-42.
6. ANDRADE, R.S.; STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. 2009. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, Brasil. 13(4):411-418.

7. AZEVEDO, A.C. y BONUMÁ, A.S. 2004. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. *Ciência Rural*, Santa Maria, Brasil. 34(2):609-617.
8. BARRETO, A.C.; FREIRE, M.B.G.S.; NACIF, P.G.S.; ARAÚJO, Q.R.; INÁCIO, E.S.B. 2008. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 32(4):1471-1478.
9. BASTOS, R.S.; MENDONCA, E.S.; ALVAREZ, V.H.; CORREA, M.M. 2005. Formação e estabilização de agregados do solo decorrentes da adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 29(1):11-20.
10. BAYER, C. y BERTOL, I. 1999. Características químicas de um Cambissolo Húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase na matéria orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 23(3):687-694.
11. BAYER, C. y MIELNICZUK, J. 1997. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 21:105-112.
12. BAYER, C. y MIELNICZUK, J. 1999. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). *Matéria orgânica do solo: fundamentos e caracterização*. Porto Alegre, Brasil: Gênese. Pp.9-26.

13. BENITES, V.M., MADARI, B., MACHADO, P.L.O.A. 2003. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: Um procedimento simplificado e de baixo custo. Embrapa, Brasília, Brasil. Pp. 7 (Comunicado Técnico 16).
14. BORGES, J.R.; PAULETTO, E.A.; SOUZA, R.O.; SILVA, J. B.; LEITZKE, V. W. 2003. Agregação de um Gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. Revista Brasileira Agrociência, Pelotas, Brasil. 9:389-395.
15. BRONICK, C.J. y LAL, R. 2005. Soil structure and management: A review. Geoderma, Amsterdam, Holanda. 124:3-22.
16. CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. 1995. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, Brasil. 19(1):121-6.
17. CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; CASSOL, L.C. 1999. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Brasil. 23(2):386-391.
18. CAMPOS, D. V. B. 2004. Mudança no conteúdo de matéria orgânica do solo sob a cultura de cana-de-açúcar e pastagem em Argissolo de Conceição da Barra – ES. Rio de Janeiro, Brasil: EMBRAPA. Seropédica, (Circular técnica, 10).
19. CANELLAS, L.P.; SANTOS, G.A.; AMARAL-SOBRINHO; N.M.B. 1999.

- Reações da matéria orgânica. In: Santos, G.A.; Camargo, F.A.O. (Eds). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Gênese, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. Pp. 69-90.
20. CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; SANTOS, G.A. 2003. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Brasil. 27:935-944.
21. CARPENEDO, V. y MIELNICZUK, J. 1990. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Brasil. 14(1):99-105.
22. CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. 1998. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Brasil. 22:527-538.
23. CHAVES, J.C.D. y CALEGARI, A. 2001. Adubação verde e rotação de culturas. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, Brasil. 22(212):53-60.
24. CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.; CERRI, C.C. 2008. Dinâmica da matéria orgânica do solo na Amazônia. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L.S. (Ed.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas

tropicais e subtropicais. 2.ed. revista atual. Porto Alegre, Brasil. Pp.325-358.

25. CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. 2005. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria Orgânica e atributos relacionados. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Brasil. 29(5):777-788.
26. CORÁ, J.E.; FERNANDES, C.; BERALDO, G.J.M.; MARCELO, A.V; 2009. Adição de areia para dispersão de solos na análise granulométrica. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Brasil. 33:255-262.
27. COSTA, O.V.; CANTARUTTI, R.B.; FARIAS, J.C. 2009. Estoque de carbono do solo sob pastagem em área de Tabuleiro Costeiro no sul da Bahia. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Brasil. 33:1137-1145.
28. CUNHA, T.J.F.; MACEDO, J.R.; RIBEIRO, L.P.; PALMIERI, F.; AGUIAR, A.C. 2001. Impacto do manejo convencional sobre propriedades físicas e substâncias húmicas de solos sob cerrado. Ciência Rural, Santa Maria, Brasil. 31:27-36.
29. CUNHA, T.J.F.; MADARI, B.E.; CANELLAS, L.P.; BENITES, V.M. y SANTOS, G.A. 2009. Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (terra preta de índio) in the Brazilian Amazon basin. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Brasil. 33:85-93.
30. DICK, D. P. y MARTINAZZO, R. 2006. Matéria orgânica em ambientes terrestres e aquáticos: compartimentos, composição e reações. In:

- POLETO, C.; MERTEN, G. H. (Org.) Qualidade dos Sedimentos. Porto Alegre, Brasil: ABRH, cap. 4, Pp. 65-80.
31. DUCHAUFOR, P. 1982. Pedology: pedogenesis and classification. London, Canada. Pp. 187
32. FERREIRA, F.P.; AZEVEDO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D.; GIRELLI, D. 2007. Carbono orgânico, óxidos de ferro e distribuição de agregados em dois solos derivados de basalto no Rio Grande do Sul-Brasil. *Ciência Rural*, Santa Maria, Brasil. 37:381-388.
33. FONTANA, A.; MATIELLO, J.D.; ANJOS, L.E.C.; PEREIRA, M.G. 2005. Fracionamento químico da matéria orgânica em solo sob diferentes coberturas vegetais em Sooretama. *Magistra*, Espiritu Santo, Brasil. 17:135-141.
34. FONTENELE, W.; SALVIANO, A.A.C.; MOUSINHO, F.E.P. 2009. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob sistemas de manejo no cerrado piauiense. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, Brasil. 40(2):194-202.
35. FORTUN, A.; BENEYAS, J.; FORTUN, C. 1990. The effects of fulvic and humic acids on soil aggregation: A micromorphological study. *European Journal of Soil Science*, Oxford, UK. 41(2):563-572.
36. FREY, S.D. 2005. Aggregation - Microbial aspects. In: HILLEL, D. (Ed.). *Encyclopedia of soils in the environment*. Oxford, UK: Elsevier Academic Press. 1:22-28.
37. GISBERT, J. M. e IBAÑEZ, S. 2010. "Génesis del suelo". Editorial Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. Pp.13-28.

38. GISBERT, J. M. 2002. Taxonomía de suelos. Soil Taxonomy- 99. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. Pp. 222.
39. HERMLE, S.; ANKEN, T.; LEIFELD, J.; WEISSKOPF. 2008. The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. Soil & Tillage Research, Madison, USA. 98(1):94–105.
40. JAKELAITIS, A.; SILVA, A.A.; SANTOS, J.B.; VIVIAN, R. 2008. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, Brasil. 38:118-127.
41. KEMPER, W. D. Aggregate Stability. In: BLACK, C. A. 1965. Methods of Soil Analysis. PART 1. Madison, Wisconsin, USA. Pp. 511-519.
42. KEMPER, W.D. y ROSENAU, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. 2.ed. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, USA. Pp. 425-441.
43. KONONOVA M.1966. Soil organic matter: its nature, its role in soil formation, and soil fertility. Pergamon, New York, USA.
44. LACERDA, N.B.; ZERO, V.M.; BARILLI, J.; MORAES, M.H. 2005. Efeito de sistemas de manejo na estabilidade de agregados em um Ultisol. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, Brasil. 25(3):686-695.
45. LAL, R. 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂ enrichment. Soil and Tillage Research, Amsterdam, Holanda. 43:81-107.

46. LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S.; MACHADO, P.L.O.; GALVÃO, J.C. 2003. Estoque de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 27:821-832.
47. LIMA, A. M. N. 2008. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 32(3):1053-1063.
48. LIU, A.; MA, B.L. y BOMKE, A.A. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Science Society American Journal*, Madison, USA. 69:2041-2048.
49. LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L.H.C. 2009. Atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistema integrado de produção agroecológica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, Brasil. 44(1):68-75.
50. LYNCH, J.M. y BRAGG, E. 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. *Advances in Soil Science*, New York, USA. 2(2):133-171.
51. MAIA, S.M.F.; OGLE, S.M.; CERRI, C.C. 2009. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. *Geoderma*, Amsterdam, Holanda. 149:84-91.
52. MARCELO, A.V. 2011. Decomposição de resíduos vegetais de culturas de entressafra em semeadura direta e efeitos nos atributos químicos do solo e na produtividade de soja e milho. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, Brasil.

90 f.

53. MARTENS, D. A. 2000. Management and crop residue influence soil aggregate stability. *Journal of Environmental Quality*, Madison, USA. 29(3):723-727.
54. MARTINS, M.R., CORA, J.E., JORGE, R.F.; MARCELO, A.V. 2009. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil & Tillage Research*, Madison, USA. 104(1):22-29.
55. MENDES, I.C.; SOUZA, L.V.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. 2003. Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio convencional e direto no Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 27:435-443.
56. OADES, J.M. y WATERS, A.G. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research*, Sídney, Australia. 29:815-828.
57. ORTIZ, C.A. y GUTIÉRREZ, M.C. 2006. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, servicio de conservación de recursos naturales. Traducción: "Claves para la taxonomía de suelos". 10 ed.
58. OLIVEIRA, J.T.; MOREAU, A.M.S.S.; PAIVA, A.Q.; MENEZES, A.A.; COSTA, O.V. 2008. Características físicas e carbono orgânico de solos sob diferentes tipos de uso da terra. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 32:2821-2829, Número Especial.
59. PASSOS, R.R.; RUIZ, H.A.; MENDONÇA, E.S.; CANTARUTTI, R.B.; SOUZA, A.P. 2007. Substâncias húmicas, atividade microbiana e carbono orgânico lábil em agregados de um latossolo vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. *Revista Brasileira de*

Ciência do Solo, Viçosa, Brasil. 31(5):1119-1129.

60. PERUSI, M.C. 2005. Discriminação de Argissolos e avaliação da estabilidade de agregados por vias seca e úmida em diferentes sistemas de uso e manejo. Tese (Doutorado), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista Botucatu, Brasil. 113f.
61. PICCOLO, A. 1999. Atmospheric CO₂ and alteration of Global Climate. In: ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS, 3., Anais. Santa Maria, Brasil: Imprensa Universitária. Pp.145.
62. PICCOLO, A. y MBAGWU, J.S.C. 1994. Humic substances and surfactants effects on the stability of two tropical soils. Soil Science Society American Journal, Madison, USA. 58(1/2):950- 955.
63. PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; SOUZA, R. C. 2003. Matéria orgânica em latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo e cobertura do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Brasil. 9(1):53-56.
64. PÔRTO, M.L.; ALVES, J.C.; DINIZ, A.A.; SOUZA, A.P.; SANTOS, D. 2009. Indicadores biológicos de qualidade do solo em diferentes sistemas de uso no Brejo Paraibano. Ciência e agrotecnologia, Paraiba, Brasil. 33:1011-1017.
65. RAIJ, B. 1981. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba, Instituto Potassa & Fosfato. Piracicaba, Brasil. Pp.142.
66. RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. 2001. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.

Campinas, Brasil, Instituto Agronômico. Pp. 285.

67. RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. 1997. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Brasil. Instituto Agronômico/Fundação IAC, 285p. (Boletim Técnico 100).
68. ROSCOE, R.; BODDEY, R. M.; SALTON, J.C. 2006. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F.M. y SALTON, J.C., eds. Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: Modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados, Brasil, Embrapa Agropecuária Oeste. Pp. 17-41.
69. RUIVO, M. de L.P.; AMARAL, I.G.; FARO, M.P.da S.; RIBEIRO, E.L.C.; GUEDES, A.L.S. 2005. Caracterização química da manta orgânica e da matéria orgânica leve em diferentes tipos de solo em uma toposseqüência na ilha de Algodual/Maiandeuá, PA. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi, Série. Ciências Naturais, Pará, Brasil. 1(1):227-234
70. SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J, BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, A.C.; BROCH, D.L. 2008. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Brasil. 32:11-21.
71. SANTOS, C. A. A. 2005. Matéria orgânica de Argissolo vermelho e Latossolo Bruno sob diferentes sistemas de manejo e sob

vegetação nativa: distribuição em frações físicas, qualidade e sorção do herbicida atrazina. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Pp.196.

72. SANTOS, G. de A. y CAMARGO, F. A. de O. 1999. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Brasil: Gênese. Pp.508.
73. SCHNITZER, M.; KODAMA, H.; RIPMEESTER, J.A. 1991. Determination of the aromaticity of humic substances by X-ray diffraction analysis. Soil Science Society American Journal, Madison, USA. 55:745-750.
74. SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; VELOSO, M.E.C.; TRIVELIN, P.C.O. 2006. Aproveitamento do nitrogênio (¹⁵N) da crotalária e do milho pelo milho sob plantio direto em Latossolo Vermelho de Cerrado. Ciência Rural, Santa Maria, Brasil. 36:739-746.
75. SILVA, F. de F. da; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; ANDRIOLI, I. 2008. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. Irriga, Botucatu, Brasil. 13:191-204.
76. SIX, J.; PAUSTRIAN, K; ELLIOTT, E.T.; COMBRINK, C. 2000. Soil Structure and organic matter: distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. Soil Science Society American Journal, Madison, USA. 64:681-689.
77. SOIL SURVEY STAFF. 2006. Keys to Soil Taxonomy, 10th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

78. SOUZA, E.D.; CARNEIRO, M.A.C.; PAULINO, H.B.; SILVA, C.A.; BUZETTI, S. 2006. Alterações nas frações do C em um Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso do solo. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringa, Brasil. 28:323-329.
79. SPACCINI, R.; MBAGWU, J.S.C.; IGWE, C.A.; CONTE, P.; PICCOLO, A. 2004. Carbohydrates and aggregation in lowland soils of Nigeria as influenced by organic inputs. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, Holanda. 75:161–172.
80. STEVENSON, F.J. 1982. *Humus chemistry*. New York, John Willey & Sons, EEUU. Pp. 443.
81. STEVENSON, F.J. 1994. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. New York, John Wiley, USA. Pp.496.
82. SWIFT, R. S. 1991. Effects of humic substances and polysaccharides on soil aggregation. In: *Advances in Soil organic matter research: the impact on agriculture and the environment*. (Wilson, W.S, editor). The Royal Society of Chemistry. Thomas Graham House, Cambridge, UK. Pp.153-162.
83. SWIFT, R.S. 1996. Method for extraction of IHSS soil fulvic and humic acids. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; eds. *Methods of soil analysis: Chemical methods*. Soil Science Society of America, Madison, USA. Pp.1018-1020.
84. TISDALL, J.M. y OADES, J.M. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soil. *European Journal Soil Science*, Oxford, UK. 33(3):141-163.

85. VEIGA, M., REINERT, D.J., REICHERT, J.M. 2009. Aggregate stability as affected by short and long term-tillage systems and nutrient sources of a hapludox in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 33:766-777.
86. VEZZANI, F.M. y MIELNICZUK, J. 2011. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 35(1):213-223.
87. WAKSMAN, S. A. 1932. *Brennstoff Chemistry*, Madison, USA. 13:241-247.
88. WENDLING, B., JUCKSCH, I. MENDONÇA, E.S., NEVES, J.C.L. 2005. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, Brasil. 40:487-494.
89. WOHLBERG, E., REICHERT, J.M., REINERT, D.J., BLUME, E. 2004. Dinâmica da agregação de um solo franco arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação em sucessão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, Brasil. 28:891-900.
90. YODER, R.E. A. 1936. Direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, USA. 28:337-351.

IX. ANEXO

Cuadro 8. Datos originales resumidos del suelo con sistema de bosque.

Manejo	N	C-AH ¹	C-AF	C-HUM	DMP	IAE	Arena	Arcilla	Limo	pH	COT	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CCC	V
Bosque 1	1	2.41	9.91	22.75	4.79	96.29	22.20	57.10	20.70	5.80	22.04	29.00	3.40	56.00	18.00	25.00	77.40	102.40	76.00
Bosque 2	2	3.04	10.29	21.50	4.88	95.56	22.80	56.75	20.45	6.30	27.26	22.00	5.50	72.00	31.00	18.00	108.50	126.50	86.00
Bosque 3	3	4.04	15.79	13.88	4.16	92.29	15.40	64.05	20.55	5.40	17.98	11.00	2.20	43.00	20.00	34.00	65.20	99.20	66.00
Bosque 4	4	2.91	12.41	21.38	4.96	97.03	18.50	61.15	20.35	6.10	27.00	15.00	6.00	67.00	31.00	25.00	104.00	129.00	81.00
Bosque 5	5	3.04	11.79	20.12	4.86	96.50	29.30	58.75	11.95	5.80	31.90	310.00	4.80	106.00	23.00	31.00	133.80	164.80	81.00
Bosque 6	6	3.04	15.29	20.80	4.81	97.36	19.60	57.35	23.05	6.00	49.88	39.00	5.10	117.00	25.00	28.00	147.10	175.10	84.00
Bosque 7	7	2.04	11.04	19.54	4.78	86.22	21.10	65.25	13.65	5.50	37.26	460.00	4.50	98.00	22.00	38.00	124.50	162.50	77.00
Bosque 8	8	4.66	9.41	21.74	4.97	98.04	29.00	60.75	10.25	5.80	37.12	71.00	4.60	108.00	24.00	31.00	136.60	167.60	82.00
Bosque 9	9	3.04	12.54	21.90	4.68	97.19	18.10	56.50	25.40	5.60	34.80	15.00	6.40	74.00	28.00	34.00	108.40	142.40	76.00
Bosque 10	10	3.29	16.54	21.73	4.92	97.30	19.90	61.80	18.30	5.60	35.96	18.00	4.90	78.00	30.00	38.00	112.90	150.90	75.00
Bosque 11	11	2.41	12.16	22.64	4.91	97.91	32.40	57.93	9.67	5.70	44.08	36.00	3.70	103.00	23.00	31.00	129.70	160.70	81.00
Bosque 12	12	2.79	13.04	22.09	4.39	92.00	18.70	61.70	19.60	5.70	25.68	14.00	6.20	67.00	30.00	28.00	103.20	131.20	79.00
Bosque 13	13	4.16	9.66	20.91	4.70	94.18	35.10	54.80	10.10	5.60	30.00	69.00	3.50	84.00	19.00	34.00	106.50	140.50	76.00
Bosque 14	14	3.04	13.04	21.32	4.28	90.34	26.00	58.40	15.60	5.70	38.66	51.00	6.80	87.00	20.00	28.00	113.80	141.80	80.00
Bosque 15	15	3.41	14.41	21.38	4.95	97.70	19.50	58.70	21.80	6.10	52.78	33.00	4.90	152.00	26.00	22.00	182.90	204.90	89.00
Bosque 16	16	2.91	13.16	20.37	4.91	99.74	19.10	64.75	16.15	5.90	40.80	19.00	4.10	106.00	28.00	28.00	138.10	166.10	83.00
Bosque 17	17	3.04	11.04	21.49	4.34	98.15	25.00	59.85	15.15	5.60	45.82	75.00	2.80	101.00	20.00	38.00	123.80	161.80	77.00
Bosque 18	18	3.41	11.41	21.88	4.93	96.13	25.20	57.40	17.40	6.00	38.86	390.00	2.00	132.00	25.00	22.00	159.00	181.00	88.00
Bosque 19	19	3.41	13.16	20.59	4.71	95.84	28.20	59.85	11.95	5.70	37.70	25.00	4.60	86.00	20.00	28.00	110.60	138.60	80.00
Bosque 20	20	3.79	9.79	21.49	4.25	94.64	26.40	57.50	16.10	5.90	24.36	470.00	4.70	103.00	26.00	22.00	133.70	155.70	86.00
Bosque 21	21	3.04	14.54	20.13	3.75	90.97	15.10	56.30	28.60	5.80	44.31	17.00	4.50	104.00	25.00	28.00	133.50	161.50	83.00
Bosque 22	22	2.66	10.41	19.07	4.84	98.08	21.10	58.50	20.40	5.70	26.10	37.00	4.10	59.00	20.00	25.00	83.10	108.10	77.00
Bosque 23	23	3.54	19.04	18.95	4.86	95.17	11.00	67.65	21.35	5.10	41.76	131.00	7.50	49.00	35.00	58.00	88.50	146.50	60.00
Bosque 24	24	4.29	9.04	18.70	4.71	98.05	28.00	55.30	16.70	5.90	40.02	59.00	2.90	107.00	20.00	22.00	129.90	151.90	86.00
Bosque 25	25	2.04	11.04	20.27	4.94	99.65	22.30	63.50	14.20	5.80	44.08	28.00	4.10	104.00	32.00	28.00	140.10	168.10	83.00
Bosque 26	26	4.66	9.41	22.29	4.88	99.87	19.80	62.15	18.05	6.50	47.56	24.00	6.20	140.00	33.00	13.00	179.20	192.20	93.00
Bosque 27	27	3.79	11.79	22.50	5.06	99.15	21.60	61.70	16.70	5.60	38.24	18.00	4.30	76.00	31.00	38.00	111.30	149.30	75.00
Bosque 28	28	3.79	9.79	20.87	5.07	98.64	20.50	71.30	8.20	6.10	44.60	28.00	3.30	121.00	26.00	22.00	150.30	172.30	87.00
Bosque 29	29	3.41	11.66	19.22	4.77	94.15	23.10	58.45	18.45	5.60	31.22	19.00	5.40	58.00	31.00	34.00	94.40	128.40	74.00
Bosque 30	30	2.79	10.54	20.45	4.93	98.85	30.00	56.19	13.81	5.80	43.50	55.00	3.10	105.00	20.00	33.00	128.10	162.10	79.00

⁽¹⁾: C-AH = Carbono orgánico del ácido húmico, C-AF = Carbono orgánico del ácido fúlvico, C-HUM = Carbono orgánico de la humina, DMP = Diámetro medio ponderado de agregados, IEA = índice de estabilidad de agregados, COT= Carbono orgánico total, SB = suma de bases, CCC= Capacidad de cambio de cationes V = Saturación por bases. Unidades: C-AH, C-AF, C-HUM y COT (g/kg); Arena, limo, arcilla y V (%); pH (CaCl₂); P (resina) (mg dm⁻³); K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H+Al, SB y CCC (mmol_c dm⁻³).

Cuadro 9. Datos originales resumidos del suelo con sistema de pasto.

Manejo	N	C-AH ¹	C-AF	C-HM	DMP	IAE	Arena	Arcilla	Limo	pH	COT	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CCC	V
PASTO 31	3.41	11.72	24.76	5.06	98.50	9.40	65.35	25.25	4.60	43.64	213.00	8.70	36.00	21.00	98.00	65.70	163.70	40.00	
PASTO 32	3.16	10.21	24.07	4.91	96.62	12.20	65.70	22.10	5.00	33.06	91.00	8.10	35.00	32.00	58.00	75.10	133.10	56.00	
PASTO 33	3.79	10.29	24.10	4.12	98.01	10.10	70.45	19.45	4.70	37.70	35.00	6.10	29.00	26.00	72.00	61.10	133.10	46.00	
PASTO 34	4.21	10.11	25.39	4.86	98.59	11.10	69.95	18.95	5.10	35.96	151.00	8.10	45.00	32.00	64.00	85.10	149.10	57.00	
PASTO 35	3.66	10.21	24.64	4.99	99.36	6.70	69.65	23.65	4.90	38.28	93.00	9.20	37.00	30.00	64.00	76.20	140.20	54.00	
PASTO 36	3.66	11.41	24.97	4.86	98.02	6.80	70.00	23.20	4.80	35.96	39.00	6.90	30.00	27.00	52.00	63.90	115.90	55.00	
PASTO 37	3.29	10.59	24.03	4.94	93.31	12.00	69.75	18.25	4.90	42.34	102.00	10.10	44.00	36.00	64.00	90.10	154.10	58.00	
PASTO 38	3.04	12.01	25.05	5.01	98.73	10.60	70.35	19.05	5.10	41.76	141.00	8.60	46.00	34.00	52.00	88.60	140.60	63.00	
PASTO 39	3.29	10.09	25.24	5.07	94.80	10.30	65.20	24.50	4.70	35.38	340.00	6.50	42.00	25.00	98.00	73.50	171.50	43.00	
PASTO 40	3.04	10.99	25.83	5.03	98.52	14.90	65.25	19.85	4.80	42.34	250.00	7.60	50.00	32.00	98.00	89.60	187.60	48.00	
PASTO 41	2.91	10.16	25.17	5.05	98.47	11.90	69.70	18.40	4.90	41.90	55.00	6.00	36.00	30.00	58.00	72.00	130.00	55.00	
PASTO 42	3.41	10.91	24.14	5.09	99.31	7.50	68.25	24.25	4.80	39.74	37.00	5.80	30.00	26.00	72.00	61.80	133.80	46.00	
PASTO 43	3.04	11.16	24.71	4.99	95.38	14.40	65.10	20.50	4.90	43.06	46.00	6.50	36.00	28.00	64.00	70.50	134.50	52.00	
PASTO 44	3.66	11.19	25.24	4.96	98.10	16.30	65.20	18.50	5.20	42.34	145.00	8.20	51.00	31.00	64.00	90.20	154.20	58.00	
PASTO 45	3.94	10.39	25.70	4.99	97.26	9.20	65.80	25.00	5.40	39.30	400.00	9.20	90.00	42.00	52.00	141.20	193.20	73.00	
PASTO 46	4.16	10.16	24.03	5.00	98.00	12.40	69.75	17.85	4.70	45.82	149.00	7.60	51.00	32.00	88.00	90.60	178.60	51.00	
PASTO 47	4.04	11.04	23.28	5.05	97.95	10.50	70.25	19.25	4.80	37.70	70.00	5.90	43.00	28.00	64.00	76.90	140.90	55.00	
PASTO 48	3.66	10.41	25.25	5.07	98.19	11.00	70.15	18.85	4.80	35.38	115.00	7.50	45.00	29.00	72.00	81.50	153.50	53.00	
PASTO 49	3.16	11.66	24.50	5.07	97.82	14.94	65.50	19.56	4.80	35.96	165.00	6.60	48.00	32.00	64.00	86.60	150.60	58.00	
PASTO 50	3.66	10.16	24.66	5.08	98.59	13.05	65.25	21.70	4.90	35.96	107.00	7.80	4.60	31.00	64.00	84.80	148.80	57.00	
PASTO 51	4.29	10.04	24.96	5.02	96.69	12.38	70.20	17.42	5.10	35.96	133.00	6.40	50.00	31.00	52.00	87.40	139.40	63.00	
PASTO 52	3.41	10.21	24.87	5.03	97.86	9.22	70.05	20.73	4.80	37.70	36.00	6.30	38.00	27.00	72.00	71.30	143.30	50.00	
PASTO 53	3.41	10.96	25.11	4.88	99.00	24.74	58.00	17.26	5.40	35.52	16.00	4.20	56.00	20.00	31.00	80.20	111.20	72.00	
PASTO 54	3.91	11.46	25.25	5.09	99.78	11.20	70.10	18.70	4.80	38.28	116.00	6.20	44.00	25.00	88.00	75.20	163.20	46.00	
PASTO 55	3.66	11.46	25.22	5.08	99.16	10.10	69.70	20.20	4.70	37.12	51.00	8.00	35.00	27.00	72.00	70.00	142.00	49.00	
PASTO 56	2.79	11.79	25.72	5.09	97.44	17.31	64.70	17.99	4.90	43.50	120.00	7.60	48.00	33.00	72.00	88.60	160.60	55.00	
PASTO 57	3.41	10.66	24.22	5.05	98.50	9.39	72.05	18.56	5.00	38.28	207.00	9.80	56.00	30.00	64.00	95.80	159.80	60.00	
PASTO 58	3.41	10.16	24.91	5.07	98.58	12.37	65.40	22.23	5.20	40.02	160.00	7.80	56.00	32.00	58.00	95.80	153.80	62.00	
PASTO 59	3.04	11.54	24.48	4.90	97.46	12.08	72.25	15.67	4.90	39.44	142.00	7.70	47.00	30.00	64.00	84.70	148.70	57.00	
PASTO 60	4.16	11.46	24.20	4.98	97.48	10.87	73.50	15.63	4.90	42.48	140.00	7.40	45.00	29.00	64.00	81.40	145.40	56.00	

(¹): C-AH = Carbono orgánico del ácido húmico, C-AF = Carbono orgánico del ácido fúlvico, C-HUM = Carbono orgánico de la humina, DMP = Diámetro medio ponderado de agregados, IEA = índice de estabilidad de agregados, COT= Carbono orgánico total, SB = suma de bases, CCC= Capacidad de cambio de cationes V = Saturación por bases. Unidades: C-AH, C-AF, C-HUM y COT (g/kg); Arena, limo, arcilla y V (%); pH (CaCl₂); P (resina) (mg dm⁻³); K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H+Al, SB y CCC (mmol_c dm⁻³).

Cuadro 10. Datos originales resumidos del suelo con sistema convencional (PC).

Manejo	N	C-AH ¹	C-AF	C-HM	DMP	IAE	Arena	Arcilla	Limo	pH	COT	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CCC	V
PC	61	4.04	2.05	6.92	1.75	77.56	8.77	67.65	23.58	5.40	13.08	84.00	5.00	35.00	15.00	31.00	55.00	86.00	64.00
PC	62	2.16	2.91	7.44	1.87	77.45	10.72	67.60	21.68	5.40	12.76	49.00	4.00	35.00	15.00	28.00	54.00	82.00	66.00
PC	63	2.41	3.16	6.68	1.48	72.85	11.14	67.35	21.51	5.40	13.92	59.00	5.10	35.00	14.00	25.00	54.10	79.10	68.00
PC	64	1.91	2.49	6.62	1.69	81.96	11.27	66.90	21.83	5.30	12.00	92.00	6.30	32.00	12.00	31.00	50.30	81.30	62.00
PC	65	2.79	3.24	7.71	1.85	74.26	10.63	67.80	21.57	5.60	12.66	63.00	4.70	38.00	16.00	25.00	58.70	83.70	70.00
PC	66	2.16	2.14	7.23	1.79	82.85	11.57	63.55	24.88	5.40	13.66	54.00	5.90	31.00	13.00	31.00	49.90	80.90	62.00
PC	67	4.06	2.76	7.38	1.97	73.16	10.38	67.70	21.93	5.40	12.01	55.00	4.10	35.00	15.00	25.00	54.10	79.10	68.00
PC	68	2.29	2.36	7.52	1.48	85.26	11.92	66.10	21.99	5.70	12.24	65.00	6.40	42.00	17.00	28.00	65.40	93.40	70.00
PC	69	1.79	3.36	6.79	1.89	82.43	11.30	64.25	24.45	5.40	13.34	43.00	4.90	29.00	13.00	28.00	46.90	74.90	63.00
PC	70	2.29	4.54	5.80	1.80	84.83	10.03	70.40	19.58	5.40	12.50	55.00	6.10	32.00	13.00	28.00	51.10	79.10	65.00
PC	71	2.29	4.04	6.35	1.46	72.28	11.11	67.75	21.14	5.70	12.18	70.00	5.20	38.00	18.00	25.00	61.20	86.20	71.00
PC	72	2.16	3.66	6.62	1.75	76.55	11.20	66.05	22.75	5.60	12.25	71.00	5.60	39.00	17.00	28.00	61.60	89.60	69.00
PC	73	1.83	4.75	6.52	1.99	80.38	11.00	70.35	18.65	5.60	12.13	50.00	5.40	38.00	18.00	28.00	61.40	89.40	69.00
PC	74	1.76	4.84	6.91	1.82	83.64	11.30	65.55	23.15	5.40	12.24	89.00	6.00	30.00	16.00	34.00	52.00	86.00	60.00
PC	75	1.56	4.94	7.04	2.17	72.41	11.50	64.35	24.15	5.50	11.54	56.00	5.20	35.00	17.00	28.00	57.20	85.20	67.00
PC	76	1.63	3.45	7.99	1.47	80.58	11.10	67.80	21.10	5.60	12.15	191.00	6.10	42.00	20.00	31.00	68.10	99.10	69.00
PC	77	1.56	2.74	7.31	1.85	73.59	11.70	62.35	25.95	5.60	12.66	63.00	5.40	39.00	17.00	28.00	61.40	89.40	69.00
PC	78	2.41	2.16	7.07	1.96	63.84	10.90	66.05	23.05	5.70	12.81	62.00	6.10	39.00	17.00	28.00	62.10	90.10	69.00
PC	79	1.91	5.16	6.20	1.82	80.45	10.10	64.55	25.35	5.60	13.34	64.00	4.20	39.00	17.00	28.00	60.20	88.20	68.00
PC	80	1.59	5.01	7.11	1.91	72.13	11.60	65.70	22.70	5.70	12.50	60.00	6.00	39.00	17.00	28.00	62.00	90.00	69.00
PC	81	1.51	4.81	5.82	2.43	83.45	11.00	66.45	22.55	5.40	12.61	49.00	3.80	33.00	13.00	28.00	49.80	77.80	64.00
PC	82	2.54	4.54	6.11	2.06	76.49	10.50	62.05	27.45	5.60	12.96	49.00	4.00	39.00	16.00	25.00	59.00	84.00	70.00
PC	83	2.79	3.34	6.62	1.69	83.20	10.60	67.90	21.50	5.50	11.67	52.00	4.90	35.00	14.00	28.00	53.90	81.90	66.00
PC	84	2.79	1.99	6.46	2.12	77.29	11.30	67.20	21.50	5.60	13.34	52.00	4.70	37.00	15.00	25.00	56.70	81.70	69.00
PC	85	1.79	3.01	6.62	2.01	80.45	10.10	66.10	23.80	5.60	12.18	131.00	5.30	38.00	16.00	28.00	59.30	87.30	68.00
PC	86	3.04	3.04	7.11	2.89	77.40	13.40	64.35	22.25	5.70	12.08	61.00	6.10	39.00	16.00	28.00	61.10	89.10	69.00
PC	87	2.80	2.00	6.83	1.94	76.35	12.00	62.40	25.60	5.40	12.76	49.00	4.40	33.00	15.00	31.00	52.40	83.40	63.00
PC	88	3.05	2.03	6.59	1.55	73.02	10.10	63.75	26.15	5.50	13.67	111.00	6.00	37.00	14.00	28.00	57.00	85.00	67.00
PC	89	3.06	3.76	7.48	2.36	79.55	5.20	64.30	30.50	5.50	12.88	52.00	6.30	34.00	13.00	28.00	53.30	81.30	66.00
PC	90	2.95	3.12	6.29	2.39	73.57	11.70	63.95	24.35	5.60	12.18	45.00	4.00	36.00	14.00	25.00	54.00	79.00	68.00

⁽¹⁾: C-AH = Carbono orgánico del ácido húmico, C-AF = Carbono orgánico del ácido fúlvico, C-HUM = Carbono orgánico de la humina, DMP = Diámetro medio ponderado de agregados, IEA = índice de estabilidad de agregados, COT = Carbono orgánico total, SB = suma de bases, CCC = Capacidad de cambio de cationes V = Saturación por bases. Unidades: C-AH, C-AF, C-HUM y COT (g/kg); Arena, limo, arcilla y V (%); pH (CaCl₂); P (resina) (mg dm⁻³); K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H+Al, SB y CCC (mmol_c dm⁻³).

Cuadro 11. Datos originales resumidos del suelo con sistema de siembra directa con rotación de soya/maíz (SDSM).

Manejo	N	C-AH ¹	C-AF	C-HM	DMP	IAE	Arena	Arcilla	Limo	pH	COT	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CCC	V
SDSM	91	5.44	2.89	8.77	4.32	94.55	14.70	66.70	18.60	6.00	15.34	52.00	4.40	70.00	24.00	20.00	98.40	118.40	83.00
SDSM	92	4.32	1.37	8.93	4.16	93.25	15.00	66.05	18.95	5.80	15.14	68.00	6.40	54.00	21.00	25.00	81.40	106.40	77.00
SDSM	93	4.16	1.91	8.48	3.77	96.11	13.50	68.75	17.75	5.70	15.72	55.00	4.70	49.00	21.00	25.00	74.70	99.70	75.00
SDSM	94	5.54	2.29	9.20	4.77	95.37	15.00	67.15	17.85	6.10	16.92	68.00	5.70	71.00	25.00	20.00	101.70	121.70	84.00
SDSM	95	5.04	2.04	9.14	4.80	91.56	7.90	65.25	26.85	5.70	16.24	49.00	4.00	48.00	22.00	25.00	74.00	99.00	75.00
SDSM	96	5.41	1.41	8.50	3.81	96.14	14.00	67.65	18.35	6.00	14.56	132.00	4.10	69.00	27.00	20.00	100.10	120.10	83.00
SDSM	97	4.29	3.26	9.36	4.23	93.06	14.70	65.65	19.65	5.70	15.98	42.00	4.40	57.00	23.00	28.00	84.40	112.40	75.00
SDSM	98	5.33	1.50	8.19	4.81	97.30	15.00	67.45	17.55	6.00	15.98	101.00	4.40	73.00	26.00	20.00	103.40	123.40	84.00
SDSM	99	5.66	0.16	8.50	4.76	97.40	15.20	66.05	18.75	5.60	14.85	54.00	7.00	49.00	21.00	28.00	77.00	105.00	73.00
SDSM	100	5.79	1.04	8.68	4.21	94.88	18.40	62.90	18.70	5.90	16.24	54.00	3.60	54.00	22.00	20.00	79.60	99.60	80.00
SDSM	101	4.79	1.04	9.02	4.61	90.78	13.20	68.90	17.90	6.00	15.40	156.00	4.00	63.00	24.00	22.00	91.00	113.00	81.00
SDSM	102	4.66	1.41	8.52	4.75	95.30	13.00	67.65	19.35	6.10	15.92	59.00	4.00	68.00	25.00	20.00	97.00	117.00	83.00
SDSM	103	4.16	1.66	8.89	4.55	94.81	11.10	69.40	19.50	5.80	16.45	57.00	6.00	59.00	22.00	25.00	87.00	112.00	78.00
SDSM	104	4.79	2.04	8.89	4.67	95.58	13.60	67.30	19.10	6.00	15.61	45.00	5.10	62.00	24.00	22.00	91.10	113.10	81.00
SDSM	105	4.91	1.41	9.03	4.74	92.77	13.90	69.20	16.90	5.90	15.36	103.00	4.60	64.00	24.00	22.00	92.60	114.60	81.00
SDSM	106	4.91	2.91	8.01	3.64	96.45	11.10	67.70	21.20	5.80	17.40	41.00	6.10	54.00	22.00	20.00	82.10	102.10	80.00
SDSM	107	5.04	1.31	8.72	3.63	94.72	14.80	65.45	19.75	5.90	16.24	33.00	6.00	63.00	23.00	22.00	92.00	114.00	81.00
SDSM	108	4.41	2.66	8.34	4.13	96.38	12.60	67.40	20.00	5.80	14.40	62.00	6.00	53.00	22.00	22.00	81.00	103.00	79.00
SDSM	109	3.91	3.66	9.03	4.80	90.07	11.40	59.95	28.65	5.90	15.06	74.00	6.00	63.00	24.00	22.00	93.00	115.00	81.00
SDSM	110	4.04	2.04	8.56	4.12	94.44	10.90	63.95	25.15	6.00	16.72	163.00	4.90	70.00	27.00	20.00	101.90	121.90	84.00
SDSM	111	4.54	2.79	8.86	4.59	91.14	12.80	64.70	22.50	5.80	15.40	45.00	4.90	64.00	24.00	22.00	92.90	114.90	81.00
SDSM	112	5.35	0.83	8.43	4.25	95.54	12.80	64.35	22.85	6.10	14.98	49.00	5.10	70.00	27.00	20.00	102.10	122.10	84.00
SDSM	113	4.44	0.96	8.81	3.96	95.33	12.80	65.55	21.65	5.80	16.85	75.00	7.30	56.00	21.00	22.00	84.30	106.30	79.00
SDSM	114	5.45	1.63	8.68	4.13	96.25	13.20	65.20	21.60	6.00	15.14	82.00	6.40	60.00	23.00	20.00	89.40	109.40	82.00
SDSM	115	5.29	0.29	8.40	4.15	95.48	13.30	64.00	22.70	5.90	15.98	44.00	3.80	59.00	22.00	20.00	84.80	104.80	81.00
SDSM	116	4.54	2.79	9.42	4.57	95.02	13.20	64.40	22.40	6.00	15.66	51.00	3.80	65.00	23.00	20.00	91.80	111.80	82.00
SDSM	117	4.09	1.99	9.43	4.36	93.55	13.40	65.80	20.80	6.10	15.42	46.00	3.80	78.00	28.00	20.00	109.80	129.80	85.00
SDSM	118	4.81	1.51	8.90	4.45	90.84	13.70	64.55	21.75	6.10	15.26	105.00	4.90	76.00	27.00	20.00	107.90	127.90	84.00
SDSM	119	3.91	1.66	8.91	4.93	91.79	13.30	65.15	21.55	6.10	16.48	50.00	4.20	77.00	28.00	20.00	109.20	129.20	85.00
SDSM	120	4.66	2.16	8.47	4.62	92.65	12.90	66.25	20.85	6.20	15.67	124.00	5.30	90.00	31.00	18.00	126.30	144.30	88.00

⁽¹⁾: C-AH = Carbono orgánico del ácido húmico, C-AF = Carbono orgánico del ácido fúlvico, C-HUM = Carbono orgánico de la humina, DMP = Diámetro medio ponderado de agregados, IEA = índice de estabilidad de agregados, COT= Carbono orgánico total, SB = suma de bases, CCC= Capacidad de cambio de cationes V = Saturación por bases. Unidades: C-AH, C-AF, C-HUM y COT (g/kg); Arena, limo, arcilla y V (%); pH (CaCl₂); P (resina) (mg dm⁻³); K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H+Al, SB y CCC (mmol_c dm⁻³).

Cuadro 12. Datos originales resumidos del suelo con sistema de siembra directa con monocultivo de maíz (SDMM).

Manejo	N	C-AH ¹	C-AF	C-HM	DMP	IAE	Arena	Arcilla	Limo	pH	COT	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CCC	V
SDMM	121	4.79	1.54	9.70	4.73	98.03	15.10	63.40	21.50	5.70	17.98	63.00	5.00	56.00	21.00	20.00	82.00	102.00	80.00
SDMM	122	5.58	2.00	10.66	4.54	97.05	13.70	68.60	17.70	6.20	16.23	151.00	4.60	71.00	24.00	16.00	99.60	115.60	86.00
SDMM	123	4.54	1.29	9.92	4.65	96.65	13.70	63.45	22.85	5.60	18.66	49.00	4.30	46.00	18.00	22.00	68.30	90.30	76.00
SDMM	124	3.91	2.66	9.65	4.82	98.33	14.50	65.90	19.60	6.00	16.78	57.00	6.50	65.00	23.00	20.00	94.50	114.50	83.00
SDMM	125	5.51	3.06	10.13	4.95	96.88	14.60	64.80	20.60	5.60	18.05	77.00	4.70	54.00	19.00	22.00	77.70	99.70	78.00
SDMM	126	4.91	1.41	10.96	4.93	97.84	14.30	63.55	22.15	5.70	16.30	76.00	4.60	51.00	21.00	20.00	76.60	96.60	79.00
SDMM	127	5.04	0.65	10.69	4.64	93.91	15.80	62.20	22.00	5.90	18.56	90.00	6.20	58.00	23.00	20.00	87.20	107.20	81.00
SDMM	128	5.04	3.29	10.81	4.86	97.39	15.70	64.50	19.80	6.10	16.88	92.00	5.10	70.00	28.00	16.00	103.10	119.10	87.00
SDMM	129	4.54	1.84	9.71	4.61	97.40	15.20	64.90	19.90	5.90	18.76	81.00	6.70	61.00	24.00	20.00	91.70	111.70	82.00
SDMM	130	5.14	3.44	10.36	4.83	99.24	15.80	61.90	22.30	5.80	18.58	63.00	5.90	54.00	22.00	18.00	81.90	99.90	82.00
SDMM	131	4.15	1.80	9.97	4.80	98.64	14.00	64.25	21.75	5.70	16.88	42.00	5.60	55.00	21.00	22.00	81.60	103.60	79.00
SDMM	132	4.38	1.95	10.50	4.70	98.61	13.20	67.60	19.20	5.80	16.42	57.00	6.50	57.00	24.00	20.00	87.50	107.50	81.00
SDMM	133	4.16	1.31	9.78	4.84	98.34	13.30	65.35	21.35	5.60	16.56	37.00	5.00	49.00	20.00	22.00	74.00	96.00	77.00
SDMM	134	4.27	1.45	10.01	4.79	98.64	15.00	65.75	19.25	5.70	17.98	47.00	6.10	49.00	20.00	22.00	75.10	97.10	77.00
SDMM	135	5.55	2.41	9.95	4.88	97.73	14.40	66.15	19.45	5.60	16.72	68.00	5.10	50.00	19.00	25.00	74.10	99.10	75.00
SDMM	136	4.76	1.36	10.62	4.70	99.10	12.00	68.75	19.25	5.70	16.82	43.00	4.30	49.00	20.00	22.00	73.30	95.30	77.00
SDMM	137	4.35	2.98	9.41	4.87	98.43	15.50	65.25	19.25	5.70	16.24	52.00	4.60	48.00	20.00	20.00	72.60	92.60	78.00
SDMM	138	4.91	2.91	10.26	4.81	99.54	13.90	67.80	18.30	6.10	17.40	56.00	3.20	65.00	25.00	16.00	93.20	109.20	85.00
SDMM	139	4.41	1.31	9.56	4.74	98.21	8.70	66.60	24.70	5.70	18.40	34.00	4.50	47.00	20.00	20.00	71.50	91.50	78.00
SDMM	140	4.80	2.53	10.37	4.56	98.71	13.80	67.95	18.25	5.80	16.72	83.00	6.20	54.00	23.00	20.00	83.20	103.20	81.00
SDMM	141	4.66	3.66	9.93	4.90	99.27	14.20	67.00	18.80	6.00	16.15	93.00	4.90	59.00	24.00	16.00	87.90	103.90	85.00
SDMM	142	4.55	1.60	10.07	4.87	98.92	13.70	67.10	19.20	6.10	16.56	69.00	6.40	62.00	24.00	16.00	92.40	108.40	85.00
SDMM	143	4.16	2.06	9.74	4.80	98.78	13.60	67.05	19.35	6.10	17.49	139.00	5.20	65.00	26.00	16.00	96.20	112.20	86.00
SDMM	144	4.29	2.54	10.20	4.92	98.60	14.90	68.35	16.75	6.00	16.24	66.00	8.30	55.00	21.00	16.00	84.30	100.30	84.00
SDMM	145	4.41	1.71	10.64	4.92	98.33	13.10	66.95	19.95	5.90	16.82	76.00	5.50	51.00	21.00	18.00	77.50	95.50	81.00
SDMM	146	4.15	1.50	10.01	4.91	99.24	14.60	68.00	17.40	6.00	18.08	48.00	6.80	48.00	20.00	16.00	74.80	90.80	82.00
SDMM	147	4.79	1.56	9.99	4.76	97.44	14.60	64.05	21.35	5.90	16.45	100.00	6.00	53.00	22.00	18.00	81.00	99.00	82.00
SDMM	148	4.79	1.79	9.47	4.85	98.92	12.60	65.95	21.45	6.10	17.98	96.00	3.70	59.00	23.00	16.00	85.70	101.70	84.00
SDMM	149	5.56	3.76	10.25	3.56	98.60	12.40	64.95	22.65	5.90	16.82	74.00	4.80	51.00	21.00	18.00	76.80	94.80	81.00
SDMM	150	4.41	1.50	9.34	4.86	98.64	15.10	66.90	18.00	6.10	18.90	148.00	4.80	63.00	25.00	16.00	92.80	108.80	85.00

⁽¹⁾: C-AH = Carbono orgánico del ácido húmico, C-AF = Carbono orgánico del ácido fúlvico, C-HUM = Carbono orgánico de la humina, DMP = Diámetro medio ponderado de agregados, IEA = índice de estabilidad de agregados, COT = Carbono orgánico total, SB = suma de bases, CCC = Capacidad de cambio de cationes V = Saturación por bases. Unidades: C-AH, C-AF, C-HUM y COT (g/kg); Arena, limo, arcilla y V (%); pH (CaCl₂); P (resina) (mg dm⁻³); K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H+Al, SB y CCC (mmol_c dm⁻³).