

Fundamentos de la Estructura de Suelos Tropicales

Alberto Hernández Jiménez, José Irán Bojórquez Serrano,
Fernando Morell Planes, Adriano Cabrera Rodríguez,
Miguel Osvaldo Ascanio García, Juan Diego
García Paredes, Alberto Madueño Molina.



Universidad Autónoma de Nayarit
Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas



Página intencionalmente en blanco



DIRECTORIO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT

C.P. Juan López Salazar
Rector de la Universidad Autónoma de Nayarit

Dr. Rubén Bugarín Montoya
Secretario de Investigación y Posgrado

Dr. Alberto Madueño Molina
Director de Fortalecimiento de la Investigación

Dr. Juan Diego García Paredes
Coordinador de Posgrado en Ciencias Biológicas Agropecuarias

M. en C. Raúl de la Peña Segura
Secretario Técnico Comité Editorial de la UAN

INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

Dra. María del Carmen Pérez Hernández
Directora General

Dr. Ramón Rivera Espinoza
Director de Investigaciones

Dr. Walfredo Torres de la Noval
Director de Educación de Posgrado

Dr. Adriano Cabrera Rodríguez
Jefe del Departamento de Biofertilizantes y Nutrición de las plantas



FUNDAMENTOS DE LA ESTRUCTURA DE SUELOS TROPICALES

PRIMERA EDICIÓN, diciembre de 2010

Trabajo y cuidado de edición: Biól. Laura Lauría
Elaboración de libro electrónico: Lauría Consultores
Diseño de portada: Rosa Esthela González Flores
D.R. © Universidad Autónoma de Nayarit
Rectoría 4to piso, ciudad de la cultura "Amado Nervo"
63190 Tepic, Nayarit

Editado digitalmente y hecho en México
ISBN: 978 – 607 – 7868 – 27 – 9



**INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, CUBA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT, MÉXICO**

FUNDAMENTOS DE LA ESTRUCTURA DE SUELOS TROPICALES

**TEPIC, NAYARIT
2010**

AUTORES:

Alberto Hernández Jiménez, José Irán Bojórquez Serrano, Fernando Morell Planes, Adriano Cabrera Rodríguez, Miguel Osvaldo Ascanio García, Juan Diego García Paredes, Alberto Madueño Molina, Oyolsi Nájera González.

COLABORADORES:

Marisol Morales Díaz, Andy García Bernal, Hermes Ontiveros Guerra, Yenia Borges Benítez, Rafael Murray Núñez, Dagoberto López Pérez, Dania Vargas Blondino, Humberto Ríos Labrada, Francly L. Marentes Amaya, Israel Gómez Juárez, Moisés Gil Pérez, Rosa Esthela González.

Página intencionalmente en blanco



PRÓLOGO

Uno de los intereses de investigación del doctor Alberto Hernández, autor principal de esta obra es la estructura del suelo, uno de los índices de calidad más evidentes en edafología. En este libro Hernández, Fernando Morell y José Irán Bojórquez con su grupo de investigadores explican con términos sencillos los procesos que controlan la estructura del suelo y señalan la importancia de su conocimiento.

La interpretación de la estructura puede recrear la conducta del suelo en el pasado, el presente y el futuro, razón más que evidente para fomentar su difusión. El libro analiza como las fuerzas del intemperismo y la descomposición han moldeado la estructura del suelo en el tiempo; expone los criterios macroscópicos y microscópicos que le definen y presenta la formación de los suelos en diversos ecosistemas mostrando los cambios que experimenta por la actividad antrópica. Además los autores proponen que la estructura del suelo debe emplearse para proponer medidas que mejoren y restauren la condición del suelo.

Los vastos conocimientos de los doctores cubanos Alberto Hernández y Fernando Morell, han sido aplicados en suelos mexicanos por el equipo de investigadores mexicanos presididos por el doctor José Irán Bojórquez de la Universidad Autónoma de Nayarit.

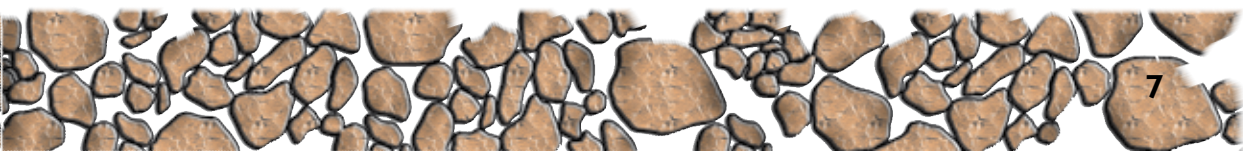
Este libro constituye una herramienta muy valiosa para estudiantes universitarios y para profesionistas cuyas actividades estén ligadas con el conocimiento de los suelos o con la toma de decisiones para su uso correcto.

Norma Eugenia García Calderón

Profesora Titular del Área de Edafología

UMDI Campus Juriquilla

Universidad Nacional Autónoma de México



INTRODUCCIÓN

Durante su formación el suelo adquiere rasgos y características que se manifiestan en su morfología y en sus propiedades físicas, químicas, hidrofísicas y mineralógicas. La morfología de los suelos se conoce a través del estudio del perfil del suelo.

Para muchos especialistas, el estudio de los suelos comienza con la descripción de sus características morfológicas y su interrelación con los factores de formación, diagnosticando los procesos de formación del suelo (Rozanov, 1983).

El suelo es el espejo de la naturaleza, constituye un bloque de memoria en el que están plasmados los fenómenos, antiguos y actuales, que han tenido lugar durante la formación del suelo. Por esto algunos especialistas aseguran que el perfil de suelo habla, y con base a lo anterior, Targulian y Sokolov (1978) establecieron los conceptos de “suelo memoria” y “suelo momento”.

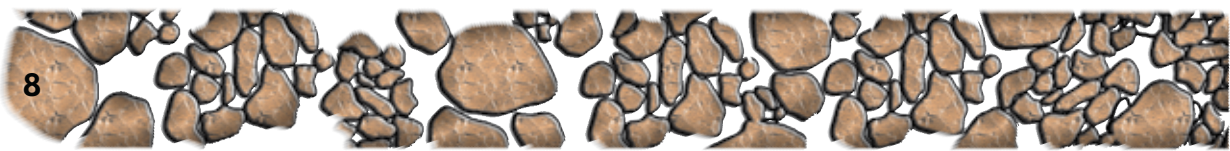
El suelo memoria es el conjunto de propiedades estables y conservadas del perfil del suelo, resultado integral de los factores y procesos de formación desde su origen hasta el momento de la observación.


El suelo momento es el conjunto de características dinámicas del suelo (resultado de los factores y procesos) en el tiempo de observación (usualmente años).

De acuerdo con Hernández y colaboradores (1995 y 2006), dentro de los rasgos morfológicos de los suelos se estudian: color, textura, estructura, consistencia, humedad, porosidad, desarrollo de los sistemas radicales, inclusiones naturales, inclusiones artificiales, reacción al HCl, reacción al NaF (en regiones volcánicas) y la transición entre los horizontes.

La estructura del suelo es una de las características más importantes ya que influye en el movimiento del agua y la retención hídrica, el drenaje, la aireación, la penetración de las raíces, el ciclo de nutrientes, y en consecuencia sobre el rendimiento de los cultivos. El suelo, durante su formación, adquiere diferentes tipos de estructura en dependencia de múltiples propiedades como el contenido y tipo de arcilla, cantidad de materia orgánica, cationes intercambiables predominantes (Jan, 1969). Al proceso de formación de la estructura se le llama agregación (floculación) y es lo contrario al proceso de dispersión (desfloculación).

Los estudios realizados por Bennett y Allison en 1928, iniciaron con la definición de los tipos de estructura en Cuba. En ellos se aplicó la clasificación de la estructura del suelo del sistema





norteamericano antiguo, a saber: fragmentaria gruesa, fragmentaria fina, fragmentaria media. A partir de 1959, con la introducción de criterios vanguardistas de suelos, por especialistas tanto chinos como soviéticos y franceses, se introdujo un nuevo sistema de clasificación de la estructura con base en su forma, creando así las categorías nuciforme, granular, terronosa, bloques subangulares, bloques angulares, prismática, columnar, y otras.

A pesar de los esfuerzos de los especialistas de suelos, aun faltan estudios que muestren los tipos de estructura que existen en los suelos tropicales de Mesoamérica y el Caribe. En consecuencia, el propósito de esta obra es proporcionar una herramienta que precise y fundamente la descripción de la estructura de los suelos tropicales con base en ejemplos de zonas tropicales de México y Cuba.

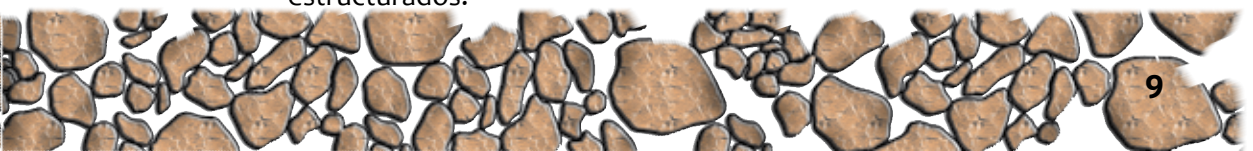
CONCEPTO DE ESTRUCTURA DEL SUELO

El término estructura de suelo tiene múltiples definiciones que es importante comprender. Según Cairo y Fundora (1994), es la capacidad del suelo para espontáneamente formar terrones que se dividan en fragmentos menores (llamados grano o agregados), sin la intervención del hombre. Es la manera en que los elementos constituyentes del suelo tienden a unirse entre ellos.

Para Hernández y colaboradores (2006) estructuración es la propiedad que tiene la masa del suelo de disgregarse por sí misma en separaciones de distintas formas y tamaños (llamados agregados).

Existen tres enfoques distintos que caracterizan el proceso de agregación del suelo (Lal *et al*, 2003):

- * **físico-químico**, comprende la floculación de la fracción coloidal, seguida por la cementación de los flóculos que se agrupan en microagregados que a su vez se juntan para formar agregados mayores.
- * **podológico o genético-morfológico**, basado en la génesis y en los factores de formación. Se reconoce que cada suelo adquiere una estructura determinada durante su formación (génesis); en principio, no hay suelo sin estructura, y pueden existir poco estructurados, medianamente estructurados y bien estructurados.



- * **agronómico**, los suelos estructurados se nombran solamente en aquellos que predominan los agregados en el rango de 0,25 mm hasta 7 (10) mm, y los agregados más pequeños (polvo) o los mayores de este rango componen una mezcla inexacta. En este sentido, los agregados del suelo polvoriento o bloques o masivos se pueden caracterizar como no estructurados.

Kaurichev y Grechin (1982), citados por Rozanov en 1983, entienden por estructura del suelo los agregados en que se puede descomponer el suelo, que tienen entre sí elementos mecánicos que los unen. Similar a esta concepción están los trabajos de Vershinin (1959) y otros autores que entienden como estructura del suelo la formación de partículas mecánicas (elementos) o microagregados de 0,25 a 7 (10) mm de tamaño.

Desde el punto de vista agronómico se diferencian agregados verdaderos y falsos (pseudogregados). Los primeros se caracterizan por una gran porosidad y resistencia al agua; los segundos tienen poca porosidad, fuerte compactación y no son estables en agua; o por el contrario, tienen una resistencia muy fuerte al agua (absoluta) a causa de la cementación que forman bloques endurecidos (llamados pánzeres). Esta descripción concuerda con la escuela de los agrofísicos.

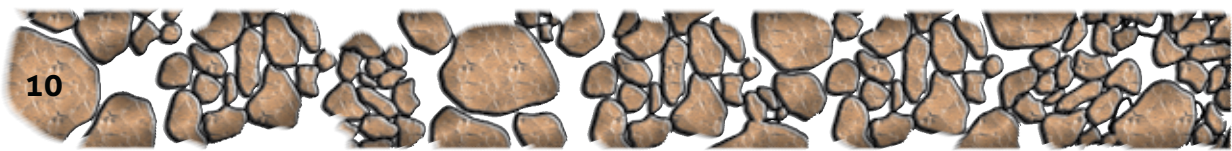
En este libro vemos la estructura del suelo desde el punto de vista genético-morfológico y por esto, las características de la estructura de los diferentes tipos de suelo entendemos que debe caracterizarse.


Desde el punto de vista genético-geográfico, el término estructura del suelo está precisado por Kachinskii (1975): como el conjunto de agregados de diferente tamaño, forma, porosidad, estabilidad mecánica y resistencia al agua, que es característico para cada suelo y sus horizontes.

Por agregado, o elementos estructurales, se entiende el conjunto de elementos mecánicos que se conservan mutuamente por fuerzas de coagulación de coloides, que pegan y los unen como resultado de fuerzas de Van der Waals, con uniones de hidrógenos de valencia residual y fenómenos de adsorción y capilares en fase líquida, y también con la ayuda de las raíces e hifas de hongos.

Para los pedólogos genéticos, como Sibirsev, Glinka, Zajarov, Vilenskii, Duchaufour y Bre, cada suelo es un cuerpo natural independiente cuya estructura tiene una concepción morfológica y genética específica (Rozanov, 1983).

En el plano morfogenético, la concepción de estructura del suelo incluye tamaño, forma y





organización de los componentes sólidos del suelo así como los poros entre ellos.

En la estructura del suelo se comprende su capacidad de descomponerse bajo condiciones naturales en agregados de diferentes tamaños y formas. A los agregados se les conoce como elementos estructurales, agregados estructurales, o peds. La distribución mutua en el suelo de agregados estructurales con determinada forma y tamaño se llama estructura del suelo. Si el suelo no se descompone en agregados naturales independientes, y tiene una situación de arena movediza como la arena o el polvo, entonces se llama sin estructura, si el suelo se rompe en grandes bloques, entonces puede nombrarse masivo sin estructura. De esta forma, las concepciones genético-morfológicas y agrofísica de suelos con estructura y sin estructura son diferentes y no deben confundirse.

IMPORTANCIA DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Para Thompson (1962) la estructura superficial y subsuperficial de los suelos tiene gran importancia ya que se interrelaciona con muchos factores indispensables para el crecimiento adecuado y desarrollo de los cultivos. A manera de ejemplo podemos citar los factores que tienen relación con la preparación de los suelos, pues influyen en la aireación y circulación del aire por el subsuelo y por consecuencia, en el grado de mullido, la porosidad, el régimen de drenaje, la penetración del sistema radicular, entre otros. También constituye una función fundamental en la pedogénesis y nutrición de las plantas, al tener gran significación en la mejora de la fertilidad y regir la actividad microbiana de los suelos. Ortega (1982), destaca la relación cíclica entre el humus y la estructura del suelo: el primero es importante para la formación del segundo; y una buena estructura vuelve al suelo más fértil y productivo.

En la opinión de los autores de esta obra, la estructura del suelo reviste importancia desde diferentes puntos de vista:

- * Por ella se diagnostican los tipos de suelos, ya que cada tipo y subtipo genético tiene una estructura característica que adoptó en su formación.
- * Cuando un suelo está bien estructurado significa que tiene una fertilidad óptima, pues tiene relación estrecha con un buen contenido en materia orgánica y actividad biológica.

- * Evita la pérdida de carbono, ya que este elemento se captura y mantiene en el suelo. Cuando un suelo se mejora con abonos orgánicos o con sistemas agroecológicos aumenta la materia orgánica (el carbono), se forma una buena estructura, disminuyen los valores de la densidad de la fase sólida del suelo, de la compactación y aumenta la porosidad del suelo.

Lal y colaboradores (2003), plantean que existen dos mecanismos distintos de protección del carbono orgánico del suelo (COS) retenido dentro de los agregados:

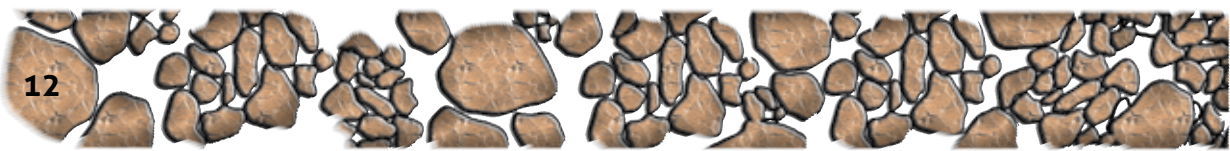
1) La protección física debido a la pequeña talla de los poros en los cuales la fracción lábil de la materia orgánica (MO) (por ejemplo, polisacáridos) puede estar ubicada. Por ser inaccesible a los microorganismos y sus enzimas una amplia proporción de superficie cubierta con COS es protegida físicamente, para liberar el carbono es necesario romper los agregados (por ejemplo por laboreo); es decir, mineralizar el carbono para provocar un rápido flujo de CO_2 .

La protección física puede ser asociada con el tamaño y distribución de las partículas primarias. Una fracción con alto contenido de COS (en el rango de 40 a 60 % del total) frecuentemente es asociada con la fracción arcilla (Christensen, 1996, citado por Lal *et al*, 2003).

2) Protección química debido a la polimerización de compuestos simples a otros de mayor complejidad. Las transformaciones químicas pueden ser provocadas por el secado o la absorción de agua por las raíces que se encuentran en crecimiento activo. El mecanismo exacto del efecto de secado o estabilización del COS es aún desconocido (Dormaar y Fostr, 1991; Dexter, 1991, citado por Lal *et al*, 2003). La formación de compuestos complejos con cationes polivalentes y polifenoles es otro mecanismo de protección química. La magnitud relativa de la protección química depende del grado de agregación, composición de los agregados, naturaleza de las sustancias húmicas, y la naturaleza de los cationes polivalentes envueltos (Lal *et al*, 2003).

FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA FORMACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

La agregación o consecuente formación de estructura aumenta conforme se incrementa el contenido de COS. En el proceso de agregación, afectado por factores (o fuerzas) físicos, químicos y biológicos (Lal *et al*, 2003), influyen el contenido de arcilla, el tipo de arcilla predominante, los iones intercambiables, los cementantes inorgánicos, los compuestos y cementantes orgánicos, el papel de la materia orgánica (las plantas y los residuos vegetales), la actividad



biológica (microorganismos del suelo) y el manejo del suelo (factor antropogénico).

Todos los factores, que se analizan en las siguientes páginas, son vitales para la formación del suelo. En este texto estudiaremos con mayor profundidad¹ el papel que juegan la materia orgánica y los microorganismos en la formación de los agregados y la estructura del suelo.

Lal (2000) asegura que los factores que afectan (o influyen) en la estructura del suelo (véase figura 1) pueden incluirse dentro de dos grandes grupos, los factores endógenos (de carácter geológico) y los exógenos (en los que hay intervención del hombre).

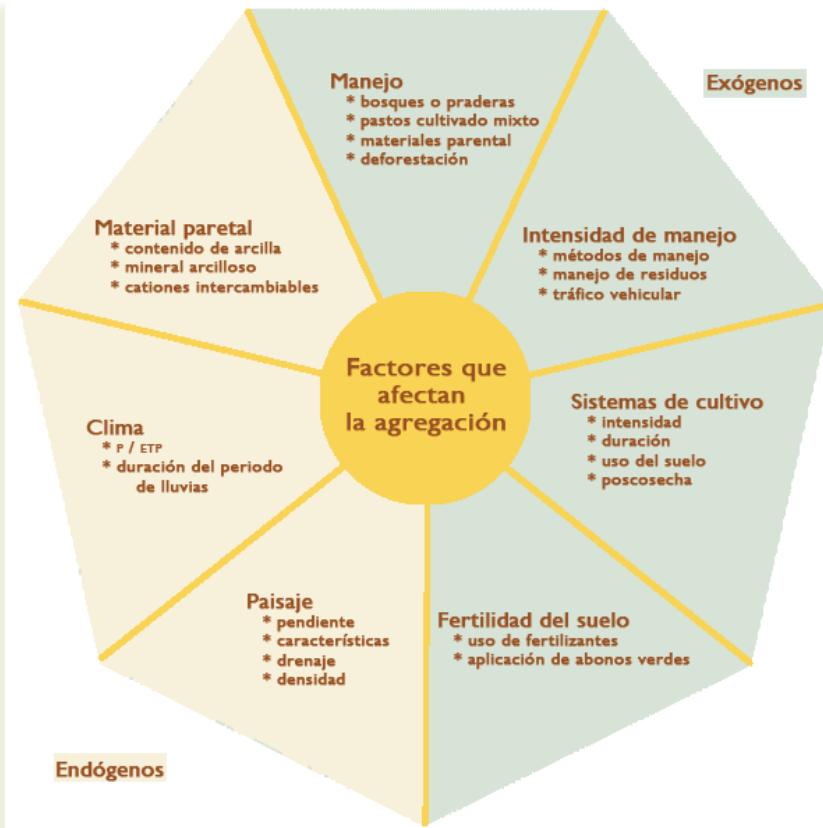


Figura 1.

Factores que afectan la agregación del suelo

1 Dedicaremos una sección especial a cada uno de ellos.

Contenido de arcilla

De acuerdo con Cairo y Fundora (1994), cuanto más arcilla tenga el suelo, mayor número de agregados tendrá. La arcilla une a las partículas de menor tamaño para formar agregados estructurales con cierta estabilidad. La formación de agregados estables no se realiza ni en arenas ni en limos (texturas con partículas gruesas), ni en ausencia de coloides. La influencia de la arcilla sobre la formación de la estructura también se debe a su acción cementante y a su propiedad de hinchamiento y contracción debido a los cambios de humedad.

En relación con esto, Lal y colaboradores (2003) plantean que suelos de diferente composición textural están formados por diferentes materiales parentales, incluso dentro de un mismo clima. Los contenidos de COS son generalmente bajos en suelos con textura gruesa. (Por ejemplo, < 30 % de arcilla y < 20 % de limo), debido a que el COS está orientado en la parte externa (superficial) de las arcillas y en estos escenarios los contenidos de COS están rápidamente accesibles a la acción de los microorganismos y no se acumula. En tales casos, el grado y estabilidad de la agregación depende de suplementos continuos de materia orgánica en cantidades suficientes para compensar la rápida pérdida de los contenidos de COS. El laboreo en tales casos pudiera disminuir los contenidos de COS y la agregación.

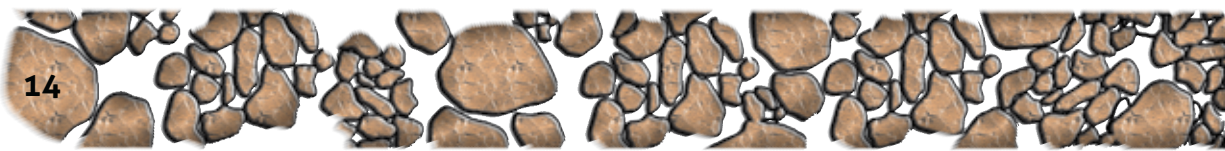
El contenido de COS se incrementa relativamente con el cambio de la textura de gruesa a media (por ejemplo, 30 a 50% de arcilla). En suelos con composición de matriz fina (por ejemplo, > 50% de arcilla) la agregación varía con el mineral arcilloso y la naturaleza de los cationes del complejo de intercambio.


Tipo de arcilla

Generalmente se tiene una regularidad en la influencia del tipo de arcilla predominante en cada estructura del suelo.

Las caolinitas forman agregados estructurales en superficie del tipo nuciforme granular (en estado virgen o conservado del suelo), o terronosa grumosa (cuando está cultivado). En el horizonte B puede formarse estructura un poco más gruesa, de bloques subangulares (en condiciones conservadas) o bloques angulares (cuando están altamente cultivados). Por su pequeño potencial electrocinético, la caolinita flocula más rápido que la motmorillonita

En el caso de la metahalosita se puede presentar un tipo de estructura de bloques prismáticos finos con forma de cuña (Hernández *et al*, 1980).





Cuando predominan las arcillas del grupo de las esmectitas, la estructura del suelo es gruesa, desde bloques subangulares hasta prismática, e incluso, columnar.

Para las arcillas del grupo de las hidromicas (ilitas), los agregados estructurales predominantes son los bloques subangulares.

Iones intercambiables

El calcio, que provoca la floculación de la arcilla, interviene en la nutrición de las plantas y en proporcionar al suelo una reacción favorable para el crecimiento radical. Un suelo con bajo contenido de materia orgánica no forma agregados estructurales rápidamente y el calcio no interviene tan fácilmente. El calcio aumenta la cohesión del suelo, frena la ruptura de los agregados y modera la dispersión de los coloides. En los agregados de arcilla cálcica, o saturada por calcio, en contacto con el agua se produce una fragmentación que termina con la formación de agregados menores. El humus cálcico da lugar a la estructura grumosa en las rendzinas.

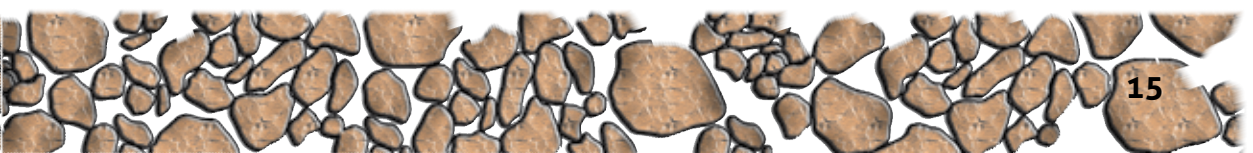
El sodio, que tiende a dispersar la arcilla, ocasiona una mala aireación del suelo, y a su vez provoca que muchos nutrientes no puedan ser aprovechados, lo que resulta en la disminución del crecimiento del sistema radical y los microorganismos del suelo.

Cementantes inorgánicos

Entre los principales cementantes inorgánicos del suelo están los sesquióxidos de hierro y aluminio que forman coloides, irreversibles o muy lentamente reversibles, que con la acción del agua ayudan a formar agregados estables.

El hierro libre aumenta la cohesión al envolver los agregados con capas bastante rígidas que detiene la influencia de los coloides arcillosos, frenan su estallido y disminuyen su grado de humedad.

El carbonato de calcio al precipitarse alrededor de las partículas de suelo también actúa como cementante. El exceso de sales causa la floculación de la arcilla, aun en suelos saturados de sodio.



Compuestos y cementantes orgánicos

Los azúcares son ineficaces hasta que entran a formar parte del tejido microbiano. Las ceras, grasas, ligninas, proteínas, resinas y algunos compuestos orgánicos tienen un efecto estabilizador directo.

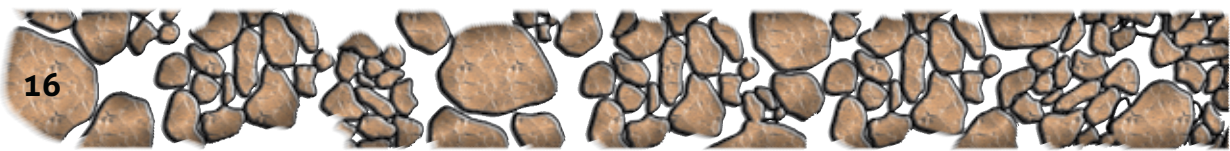
Los metanolitos microbianos, como lípidos y proteínas, están implicados en la estabilización del suelo. Sin embargo, se ha puesto mayor énfasis en los polisacáridos extracelulares tanto de los vegetales como de los microorganismos. Los polisacáridos que intervienen en la agregación del suelo, fundamentalmente son de origen microbiano, producidos durante la descomposición de los residuos de los vegetales (Durodoluwa *et al*, 1999). La continua aplicación de residuos en el suelo, y la existencia de una población microbiana activa produciendo estos agentes cementantes son esenciales para la creación y retención de la estabilidad de la estructura del suelo.


Boix-Fayos y colaboradores (2001) clasificaron los agentes cementantes en tres grupos:

- * **transitorios:** materiales orgánicos que se descomponen rápidamente por los microorganismos; el grupo más importante son los polisacáridos y su efecto puede durar semanas.
- * **agentes temporales:** raíces e hifas, particularmente proveniente de hongos micorrízicos vesículo arbusculares, ellos persisten por meses o años y son afectados con el manejo.
- * **agentes persistentes:** materiales húmicos degradados asociado con hierro amorfo, aluminio y aluminosilicatos. El humus es uno de los elementos del suelo cuya influencia en la estabilidad de la estructura es más intensa.

Los mismos autores junto con Zach y colaboradores (2006), propusieron una clasificación con base en el tamaño de los agregados:

- * **Agregados > 2000 μm .** son sostenidos por una fina red de raíces e hifas, en suelos con altos contenidos de carbono orgánico > 2%. Agregados entre 20 y 250 μm consisten mayormente en partículas 2- 20 μm de diámetro, unidos por varios materiales cementantes como materiales orgánicos, óxidos cristalinos y





aluminosilicatos.

- * **Agregados > 2 μm de diámetro**, estables en agua de 2-20 μm , unidos fuertemente entre sí por agentes orgánicos. En los agregados entre 2-20 μm existe una asociación entre las células de bacterias vivas y las partículas de arcilla.

La Tabla 1, muestra un estudio realizado en Alfisoles, en la cual aparecen una serie de agentes estabilizadores, los cuales ejercen su función como agentes cementantes, según el tamaño del agregado (Lal et al, 2003).

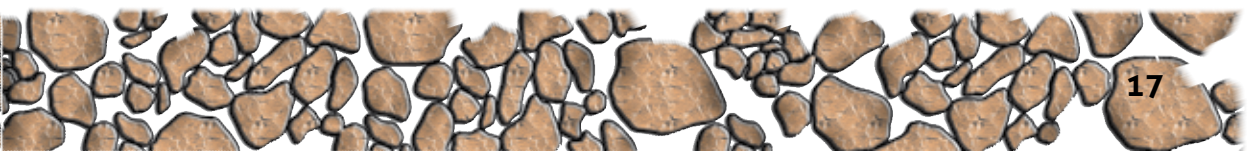
Tabla 1.

Modelo de agregación y agentes de mayor estabilidad de Alfisoles

Agentes estabilizadores	Tamaño de los agregados (μm)
Materiales y polímeros orgánicos, agentes cementantes electrostáticos	< 0.2
Derivados de hongos y bacterias	0.2 - 2 - 2 - 20
Derivados de hongos y plantas	2 - 20 - 20 - 50
Raíces e hifas	20 - 50 - > 2000
Polisacáridos	20 - 50 - > 2000

Aire

El aire influye en la formación de la estructura al crear tensión superficial y en la expansión de una masa de suelo al humedecerse. También con períodos relativamente amplios de inundación, donde impera la falta de oxígeno en el suelo la estructura se deteriora hasta llega a destruirse por completo. El aire, desde el punto de vista biológico, es imprescindible para la respiración de los organismos.



Temperatura

La temperatura influye en el movimiento del vapor por diferencia de presiones, afecta la velocidad de las reacciones y consecuentemente la descomposición de la materia orgánica. También afecta a la actividad de las plantas y microorganismos, e interviene en la formación del tipo y cantidad de arcilla, potencial electrocinético, cantidad de sales solubles y de materia orgánica presente.

Presión

Cuando se ejercen presiones sobre la masa de suelo húmedo, las partículas de arcillas se orientan y permanecen unidas por atracción molecular. Estas presiones se pueden ejercer por humedecer y secar el suelo (hinchazones y contracciones), por los implementos agrícolas o por el propio peso del suelo.

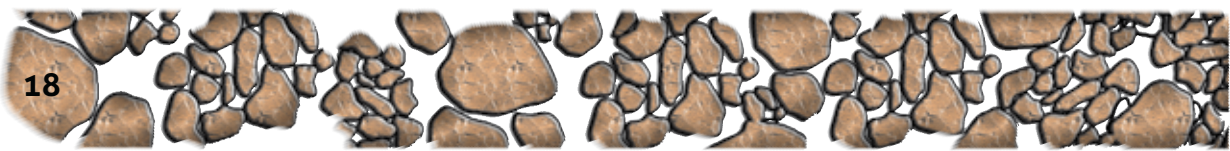
Agua

La alternancia de humedad y desecamiento en el suelo provoca fenómenos de dilatación y contracción de los coloides, lo que a su vez influye en la formación de los agregados del suelo.

La temperatura y los regímenes de humedad afectan la agregación a través de su influencia en:

- * las diferencias de textura (contenido de arcilla) y minerales arcillosos.
- * el contenido de humus y su calidad (Lal *et al*, 2003) La tensión superficial que resulta de la presencia de superficies de agua es principalmente en sentido vertical. Estaciones muy secas causan formación de agregados en el subsuelo.

La estructura columnar es producto de la pérdida acelerada de agua en el perfil de suelo. El agua, durante el periodo de crecimiento, asegura tanto la máxima actividad biológica en el suelo como los otros factores de crecimiento. Los cultivos con mayor demanda de agua durante el proceso de crecimiento, pueden afectar la agregación del suelo porque la absorción del líquido por las raíces causa una deshidratación diferencial, encogimiento, y múltiples grietas pequeñas (Hillel, 2004)



EL PAPEL DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LOS AGREGADOS DEL SUELO

La materia orgánica del suelo (MOS) está integrada por diversas sustancias orgánicas en varios estados de descomposición (Helfrich *et al*, 2006). La presencia y concentración de la MOS y la actividad biológica de los suelos tropicales (descrita en la siguiente sección) tiene una influencia significativa en sus propiedades físicas y químicas; por ende en la estructura del suelo (Durodoluwa *et al*, 1999 y Roldán *et al*, 2005). Tanto la cantidad como la distribución de la materia orgánica son sumamente afectadas por el manejo (Beare *et al*, 2007; Whalen *et al*, 2006; Morell *et al*, 2006 y Hevia *et al*, 2007).

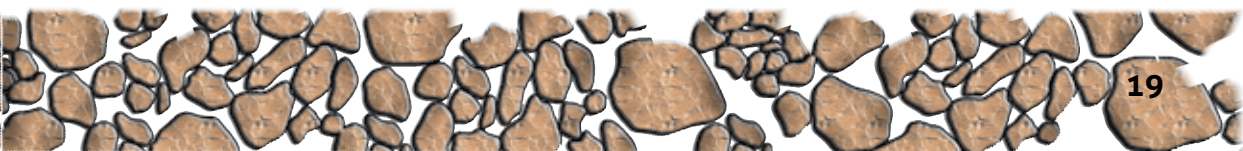
Los cultivos tienen gran influencia en la agregación. Las raíces, especialmente las finas, y las sustancias orgánicas liberadas por ellas contribuyen en la formación de agregados (Alan *et al*, 2004 y Zach *et al*, 2006). La relación carbono nitrógeno (C : N) y las propiedades bioquímicas de los residuos de los cultivos que afectan la descomposición y la dinámica de la MOS influyen también en la agregación del suelo (Martens, 2000).

Cuando el rango de oxidación de la materia orgánica es reducido ésta se acumula en la superficie del suelo (Six *et al*, 1998). Entre los tratamientos de manejo más o menos 5 cm debajo de la superficie, disminuye la diferencia entre carbono orgánico del suelo (COS) y nitrógeno total. El carbono orgánico del suelo cambia más despacio en climas áridos y fríos donde la descomposición de la materia orgánica es lenta; y con mayor rapidez en los climas tropicales donde los procesos de degradación se aceleran.

Durodoluwa y colaboradores (1999) y Wright y colaboradores (2007) al observar la mejora de la estructura del suelo sin cambios notables en la concentración de la MOS concluyeron que algunas fracciones específicas de la materia orgánica están involucradas en la estabilización de los agregados del suelo.

En las regiones tropicales cerca de la mitad de las pérdidas de suelo por erosión ocurren temprano, en la época de plantación cuando la cobertura del suelo es insuficiente (Durodoluwa *et al*, 1999). En este sentido, Helfrich y colaboradores (2006) y Wright y colaboradores (2007) consideran vital identificar los manejos de suelo que ayuden a mejorar la MOS y especialmente las fracciones de la materia orgánica que son activas en la estabilización de los agregados.

Para identificar la fracción activa de la MOS Magid y colaboradores (1996) han involucrado la caracterización del carbono y de los carbohidratos de partículas de suelo de diferentes tamaños; en tanto Roberson (1991; 1995) utilizó partículas de suelo de varias densidades. Estos investigadores encontraron que los carbohidratos en partículas de suelo pesadas (densidad $>1.74 \text{ Mg m}^{-3}$) estaban integradas de polisacáridos de productos microbianos extracelulares que tenían una influencia positiva en la agregación del suelo. Durodoluwa y colaboradores



(1999) descubrieron que la concentración de estas fracciones pesadas de polisacáridos, fueron influenciadas por el manejo del suelo y el estado de nutrientes a través de las dos épocas de crecimiento.

Los agregados estables en agua protegen el C y el N de la descomposición microbiana, por eso incrementan el almacenamiento de los mismos en el suelo (Davidson *et al*, 2006), aunque esa protección es altamente susceptible a la perturbación (Balesdent *et al*, 2000). La estructura del suelo puede de esta manera jugar un importante papel en determinar la habilidad del suelo para retener C (Lal *et al*, 2003; Smith 2004).

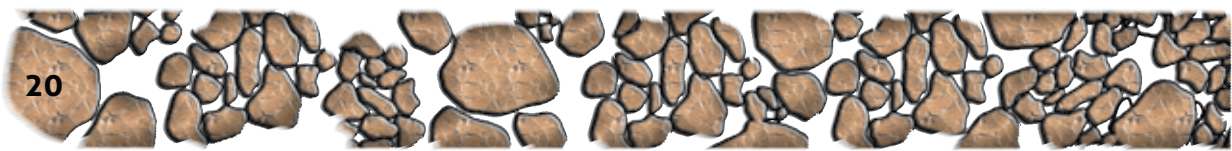
Los abonos incrementan el carbono en el suelo y consecuentemente aumentan la concentración de COS (Jarecki y Lal, 2003). Follett (2001) estimó que al aplicar abonos se obtendrían valores de captura de COS en el rango de 200 a 500 kg C ha⁻¹ año⁻¹. La aplicación de 45 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de abono orgánico por 2 años incrementó la MOS y proporcionó los mayores valores de agregados estables en agua (AEA) > 2 mm en sistemas de manejo convencional (MC) y de no labranza (NL) (Whalen *et al*, 2003).


Como parte de la formación natural de los suelos el contenido de materia orgánica (especialmente la fracción humus) con el hierro forman microagregados estables en la parte superior del perfil de los Ferralsoles, Lixisoles y Nitisoles (Boix-Fayos *et al*, 2001; Hernández *et al*, 2006 y Morell *et al*, 2006), los que tienden a disminuir por la influencia antropogénica, cuando el suelo es sometido a cultivo intensivo.

LA ACTIVIDAD BIOLÓGICA Y LOS AGREGADOS DEL SUELO

Whalen y colaboradores (2006) afirman que los cambios en las propiedades físicas o químicas del suelo, afectan la actividad biológica. La ecología, por su parte, asegura que el cambio es recíproco pues cuando los microorganismos responden a su ambiente modifican el entorno para favorecer su crecimiento (Rillig *et al*, 2007).

El suelo, formado por un complejo jerárquico de agregados, es un aspecto del hábitat fuertemente influenciado por la actividad de la biota que en él habita (Miller y Jastrow, 2000). Los estudios y conceptos que enlazan a los microorganismos del suelo con la estructura del mismo, datan de principios de 1990 hasta el presente (Six *et al*, 2004). Los microorganismos del suelo participan en las funciones del ecosistema (como descomposición, ciclo de nutrientes, y mantenimiento de las propiedades fisicoquímicas) y junto con la fauna del suelo juegan una función importante en la formación y estabilización de la estructura del suelo (Davidson *et al*, 2006).





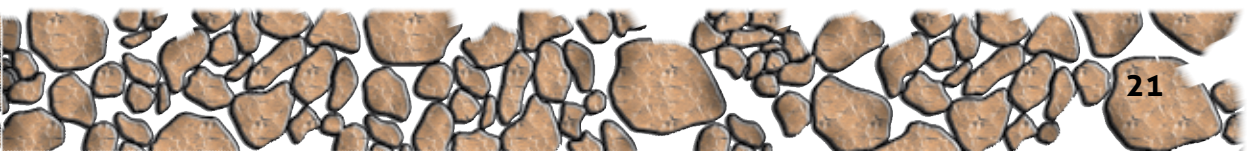
Las propiedades biológicas del suelo, esenciales para su sustentabilidad, son indicadores importantes de la calidad del suelo (Green *et al*, 2007). En la transformación microbiana de los residuos orgánicos gradualmente comienzan a incrustarse con la arcilla y mucílago microbiano, dentro de los microagregados estables, partículas de material orgánico Fragmentado (PMO) conformándose así microagregados estables. Éstos presentan una descomposición más lenta que los macroagregados y están mejor protegidos contra la descomposición microbiana (Pulleman *et al*, 2005). La continua aplicación de residuos al suelo y la presencia de una población microbiana activa, produciendo estos agentes cementantes, son vitales para la creación y retención de una estructura estable del suelo.

El sistema biológico fluye continuamente debido a los cambios ambientales (Green *et al*, 2007). En trabajos recientes se ha reconocido que la relación recíproca entre fauna y estructura es la naturaleza del hábitat y es de vital importancia en la influencia de la actividad biológica (Young y Crawford, 2004; Davidson *et al*, 2006).

La actividad de excavación de las lombrices de tierra incrementan el volumen de los macroporos en el suelo (Capowiez *et al*, 2000), los rangos del movimiento del agua en el suelo, la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiológica y las propiedades físicas del suelo (Fonte *et al*, 2010). Un incremento de la población de lombrices ha sido relacionado a una mayor estabilidad de los agregados y materia orgánica dentro de los agregados (Pulleman *et al*, 2005). Existe evidencia que las deposiciones de las lombrices pueden ser más estables que los agregados del suelo (Spring, 2003). El examen de una lámina delgada de suelo, reveló que los horizontes orgánicos y organominerales están dominados por excrementos de meso y macro fauna, descubrimiento que muestra la importancia de la fauna del suelos en la formación de los horizontes organominerales (Davidson *et al*, 2006), Muchos de estos excrementos se habían fundido de formas indiferenciables, pero algunos pudieron ser asociados específicamente con las lombrices.

Pulleman (2005), con sus colaboradores, estudió que bajo condiciones relativamente disturbadas, estos suelos ofrecen excelentes condiciones para el desarrollo de las mayores poblaciones de lombrices y una estructura biogénica del suelo favorable (SBS), con formación de macroagregados estables con aspecto de bloques subangulares. El mismo autor plantea que en suelos de laboreo convencional la actividad de las lombrices ha declinado considerablemente ocasionando la formación de la estructura fisiogénica del suelo (SFS), principalmente de bloques angulares relativamente grandes.

Fonte (2010) demostró que las deposiciones de las lombrices (SBS) tienen gran influencia en el tamaño y actividad de la biomasa microbiana, disponibilidad de nutrientes y proveen mayor estabilidad de agregados que los SFS debido a dos procesos principales:



1. **enriquecimiento de nutrientes**, resultado de la incorporación de materia orgánica de la superficie del suelo
2. **procesos bioquímicos y microbianos**, asociados al intestino de la lombriz que ocurren durante el pasaje del suelo a través del mismo.

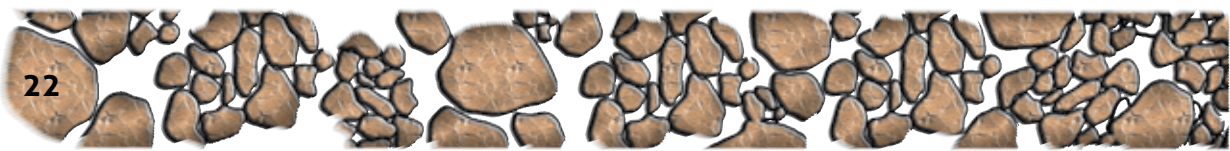
Estos resultados coinciden con los obtenidos por Pulleman y colaboradores (2005), quien también estudió el impacto de la actividad de las lombrices en la macro y microagregación del suelo y la incorporación de la MOS en diferentes sistemas de cultivo. El tamizado de agregados en seco (4 a 12.5 mm) del suelo de un pasto permanente (PP), un sistema de cultivo convencional (CC) y un sistema de cultivo orgánico (CO) (0 a 10 y 10 a 20 cm de profundidad) fueron separados en diferentes fracciones de agregados, a los cuales se les fue analizado el carbono y nitrógeno orgánico.


La comparación de diferentes tipos de macroagregados en una lámina delgada, reveló que los macroagregados producidos por las lombrices en el suelo PP, estaban considerablemente enriquecidos con partículas de materia orgánica (PMO) y microagregados, en los cuales grandes cantidades de materia orgánica estaban mezcladas estrechamente en material mineral fino. En contraste, las deposiciones de lombrices en los suelos CC y CO fueron fuertemente enriquecidos en PMO y microagregados. Pulleman también encontró que en los suelos PP y CO, el contenido de carbono orgánico (C) de la fracción de macroagregados, se incrementó en el orden fisiogénicos < intermedios < biogénicos.

El incremento en el contenido de C fue solamente significativo para los agregados biogénicos a la profundidad de 10 a 20 cm. A estas profundidades el contenido de C orgánico de las deposiciones de lombrices fue de un 44% y 27% mayor que en los macroagregados fisiogénicos para los suelos PP y CO respectivamente. Este estudio demostró que las lombrices pueden iniciar directamente la formación de microagregados, los cuales tienen un efecto en la protección física de la MOS contra el decaimiento microbiano.

En Alfisoles, Mollisoles y Ultisoles la capa superficial de un suelo no labrado, generalmente tiene mayor actividad biológica que la de suelos perturbados (Linn y Doran, 1984). Valpassos y colaboradores (2001) encontraron que un Oxisol con 8 años sin labrar presenta, en comparación con un suelo que permanece con la vegetación nativa, un incremento en la biomasa microbiana y el carbono orgánico del suelo,.

La diversidad de las bacterias del suelo, así como la biomasa microbiana y el carbono mineralizable son más en los agregados de mayor tamaño que en los agregados pequeños debido a la protección del C orgánico por los agregados del suelo (Lupwayi *et al*, 2001).





A escala inferior, en milímetros, las bacterias en el subsuelo se encuentran en paquetes (patches, en inglés) cercanos a los poros; y de manera aleatoria, en la superficie (Nunan *et al*, 2003). Esta variación espacial de las poblaciones bacterianas en el horizonte húmico acumulativo puede estar más ligada a la actividad de la fauna reflejada en las acciones animales actuando como vectores por la colonización de nuevos hábitat por los microbios del suelo (Rantalainen *et al*, 2004).

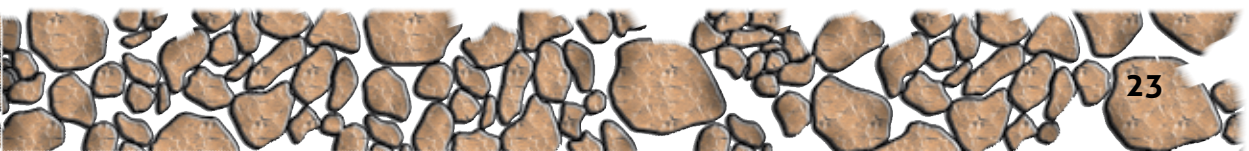
Los hongos también son importantes en la formación y estabilización de los agregados del suelo; frecuentemente son el mayor componente de la biomasa microbiana en los suelos cultivables. El tamaño y la distribución de la población fúngica del suelo está relacionada con la cantidad y calidad de la materia orgánica aportada y los métodos de manejo del suelo empleados (Beare *et al*, 2007).

Se han desarrollado estudios para explicar la función de la microflora del suelo en la formación y estabilización de los agregados (Molope *et al*, 1987). Aunque se cree que los hongos generalmente son más efectivos en la estabilización de los agregados que otros microorganismos del suelo, muchos estudios han concluido que su contribución primaria a la agregación es a través del enrejado de hifas en las partículas del suelo (Whalen *et al*, 2006).

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son simbiosntes asociados con la mayoría de las plantas terrestres (Rillig *et al*, 2005; 2007). Sus efectos sobre la agregación del suelo recientemente han recibido especial atención (Rillig y Mummey, 2006). La presencia de estos hongos tiene una gran influencia tanto en la estructura de las poblaciones de plantas (Philip *et al*, 2001) como en las comunidades (Hart *et al*, 2003) y en los procesos del ecosistema (Rillig, 2004), incluidos los ciclos de los nutrientes (Read y Pérez Moreno, 2003).

La causa de la estabilización de los agregados del suelo es aún tema de estudio. Algunos investigadores sostienen que es el conjunto de hifas micorrízicas (Balesdent *et al*, 2000; Paustian *et al*, 2000; Six *et al*, 2000. citado por Noellemeyer *et al*, 2008); otros los microorganismos, por efecto combinado de las hifas fúngicas, actinomicetos, y exudaciones de biopolímeros pegajosos, especialmente polisacáridos (Durodoluwa *et al*, 1999).

Existen pocos estudios de campo que describan la relación entre las poblaciones fúngicas, MOS y la agregación del suelo (Miller y Jastrow, 1990). Algunos investigadores han asociado el incremento de la agregación del suelo con el laboreo mínimo o nulo con un mayor crecimiento de actividad fúngica. La presencia de hongos tiene una función importante en la formación de macroagregados, y disminución de la destrucción física del suelo por el arado y otras actividades agrícolas, y a largo plazo puede incrementar la agregación y el almacenamiento del carbono en sistema de no labranza (Whalen *et al*, 2006).



Las hifas de los HMA producen una gran cantidad de glomalina, sustancia café rojizo insoluble en agua, parecida a un pegamento (Driver *et al*, 2005; Wright, 2000; Wright *et al* 2007; Rosier *et al*, 2008), que ha sido relacionada con la estabilidad de los agregados (Nichols y Wright, 2005; Rillig y Mummey, 2006; Purin *et al*, 2007; Giovannetti *et al*, 2009) pues actúa como un agente cementante uniendo las partículas del suelo entre sí.

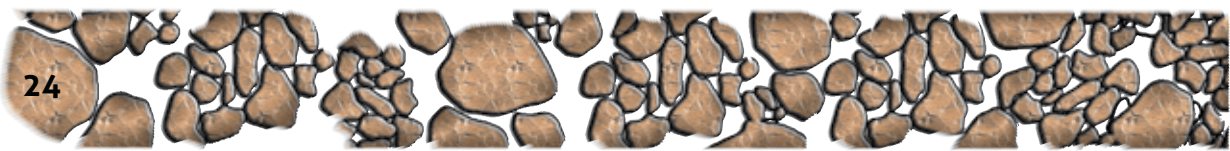
Las proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (PSRG), son uno de los mecanismos de interacción (bioquímicos, fisicoquímicos y biológicos), mediados por HMA, que contribuyen a la agregación del suelo (Matthias y Mummey, 2006; Rillig *et al*, 2007; Purin *et al*, 2007; Hontoria *et al*, 2009).

La concentración de las PSRG en suelo fue correlacionada con la estabilidad de los agregados del suelo. Se han realizado múltiples investigaciones para determinar la función de los HMA en la agregación del suelo. (Purin *et al*, 2007).

Wösten (2001) y Linder (2005), que incluyeron en sus estudios la secuencia genética de HMA, recientemente, con la descripción de la secuencia genética de la glomalina, los trabajos sobre esta proteína han cambiado, incluyendo la fisiología del hongo. Esto desarrolla un nuevo modelo para la función de la glomalina y postula un papel primordial en la fisiología fúngica, surgiendo como efecto secundario su función en el ecosistema, liderado por la correlación observada de las PSRG con la estabilidad de los agregados.

Las hidrofobinas, proteínas fúngicas, pueden desarrollar diferentes funciones y se generan bien sea como respuesta al ambiente o en las diferentes etapas del ciclo de vida de los hongos.

Green y colaboradores (2005), examinan la distribución de la talla de los agregados y el carbono total en agregados de 0 – 5 cm. de profundidad bajo tres sistemas de manejo diferentes: no laboreo (NL), labranza con cinceles (CT), y un sistema orgánicamente manejado, intensamente disturbado (ORG), con el objetivo de relacionar manejo, agregados y erosión. Estudios realizados por (Wright *et al*, 2007), examina los agregados de los estudios de Green y colaboradores (2005), con el objetivo de: 1. comparar concentración de glomalina con concentración de carbono total en agregados 2. Definir diferencias relacionadas con los tratamientos en cuanto a concentración de glomalina por clases de tallas de agregados y 3. Caracterizar la clase y distribución de glomalina relacionada con los tratamientos. Los resultados muestran diferencias en cuanto a la concentración y distribución de PSRG en las diferentes fracciones del suelo debido al manejo del mismo. La concentración y distribución de PSRG fue diferente entre NL y CT u ORG, y fue similar para CT y ORG.



FORMACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LOS SUELOS

La estructura del suelo es la condición más favorable para el crecimiento de las plantas (Wright *et al*, 2000; Hillel, 2004) pues determina el estado de humedad del suelo, la dinámica de los nutrientes (Whalen *et al*, 2006) y la pérdida de éstos por erosión y escurrimientos superficiales.

Los agregados del suelo, que forman parte de la estructura, son importantes para mantener la porosidad del suelo y proveer estabilidad contra la erosión (Lupwayi *et al*, 2001). La estabilidad de los agregados sirve como indicador de la degradación del suelo (Cerdá, 2000).

La formación de agregados depende de la humedad y resequedad del suelo; los ciclos de congelamiento y descongelamiento; los cambios de temperatura; el manejo; el crecimiento de las plantas y la actividad biológica del suelo. De todos estos procesos se generan las fuerzas fisicoquímicas que mantienen unidas a las partículas del suelo (Boix-Fayos *et al*, 2001).

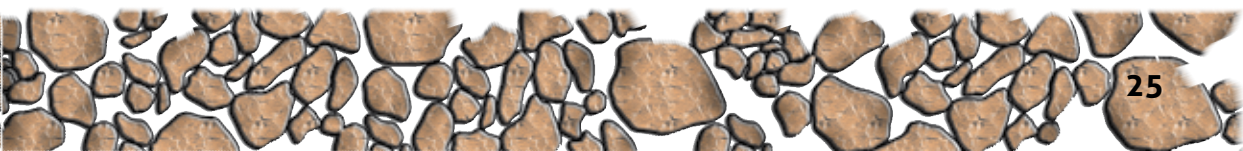
La formación de la estructura del suelo prácticamente tiene dos pasos secuenciados: la formación de microagregados y la de los agregados del suelo.

El arreglo que las partículas toman para formar los agregados es determinado por la fracción coloidal del suelo: las arcillas y el humus.

El humus se forma por grandes cadenas orgánicas, que unen las partículas arcillosas entre sí para integrar partículas secundarias de diversos tamaños y formas. El proceso de unión es facilitado por cationes polivalentes (como Ca^{+2} , Mg^{+2} , AL^{+3} , Mn^{+3} , Fe^{+3}). La formación de partículas secundarias estables, o agregados, influye en la captura del carbono al proteger la materia orgánica de las enzimas microbianas, creando poros estrechamente interconectados (Lal *et al*, 2003). De acuerdo con el tamaño y la forma de las partículas secundarias se genera una arquitectura y distribución de poros específica que regula el crecimiento de las raíces de las plantas, el intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera, la difusión de nutrientes y la retención de agua.

Proceso de formación de microagregados del suelo

El primer paso en la agregación del suelo, es la formación de microagregados (elementos mecánicos) que se logra por diferentes fuerzas que retienen y cementan las partículas primarias manteniéndolas en su lugar. Ejemplo de dichas fuerzas es el proceso de sedimentación conjunta de los coloides y la coagulación de estos por influencia de los electrolitos que, particularmente en el suelo, tiene lugar por el cambio parcial de Eh y pH (Kachinskii, 1975).



La unidad básica de los microagregados es la partícula arcillosa (Lal *et al*, 2003), que al unirse entre sí con cationes polivalentes (M) y carbono orgánico del suelo (COS), formando las siguientes combinaciones:

Arcilla - M - Arcilla

Arcilla - COS - Arcilla

Arcilla - M - COS - Arcilla

En los horizontes húmicos los microagregados primarios en su mayoría son orgánicos; en tanto, en los horizontes minerales son poliminerales.

Los microagregados se enlazan entre sí con la ayuda de sustancias cementantes (tanto minerales como orgánicas) y generan microagregados y macroagregados de mayor orden. En calidad de sustancias cementantes puede actuar en este sentido tanto sustancias minerales como orgánicas. Es importante resaltar, que desde sus primeros estadios presentan propiedades fundamentales, en especial la porosidad.

La tipología de la estructura del suelo es vital para la morfología del suelo, ya que a través de ella se contribuye a determinar su significado de diagnóstico genético. Zajarov, científico ruso, determinó los tipos de estructura de los diferentes horizontes genéticos del suelo.

En los suelos, particularmente en los horizontes húmicos acumulativos, se forman agregados de diferentes tamaños: microagregados y macroagregados. Los microagregados son agregados del tamaño del limo (microagregados de primer orden) y de la arena (microagregados de segundo orden). Los primeros forman los agregados de mayor tamaño, que a su vez conforman los diferentes tipos de estructura del suelo (véase figura 2; Rozanov, 1983). Los microagregados tienen mayor estabilidad que los macroagregados, y el laboreo consecuentemente destruye más fácil a los agregados grandes que a los menores (Boix-Fayos *et al*, 2001).

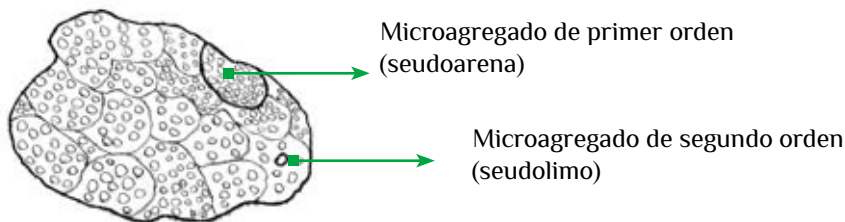
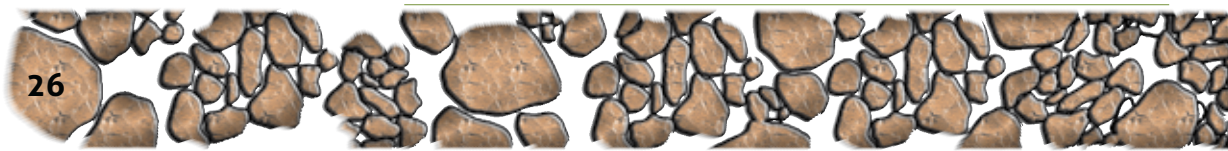



Figura 2.

Agregados que se forman en suelos con horizonte húmico acumulativo





En los suelos tropicales evolucionados como los Ferralíticos y Ferríticos, ricos en hierro, la materia orgánica y las partículas arcillosas se mezclan con el hierro para formar complejos órgano minerales de mayor firmeza que dan lugar a microagregados muy estables en la mayoría de los suelos de textura franco arcillosa y arcillosa. Para obtener una verdadera determinación de la composición mecánica (arcilla, limo y arena) en los suelos tropicales evolucionados, deben romperse los microagregados, de lo contrario cuando se hace la determinación de la composición mecánica del suelo (determinación de arcilla, limo y arena), entonces los microagregados sedimentarán como seudolimos o pseudoarenas, obteniéndose de esta forma una composición mecánica errónea del suelo y alterarán los resultados.

Formación de los macroagregados que definen la estructura del suelo

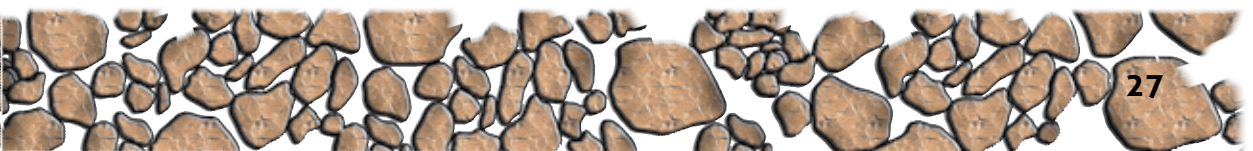
En la formación de la estructura del suelo se pueden diferenciar dos estadios normalmente de aparición simultánea:

- * separación mecánica de los suelos en agregados de diferentes tamaños y formas.
- * consolidación de cada agregado como unidad.

La separación mecánica es consecuencia del agrietamiento primario producido por la humedad y la desecación, la congelación y descongelación, calentamiento y enfriamiento, la acción mecánica de las raíces y la fauna del suelo.

El grado de dilatación que adquiere el suelo al humedecerlo depende de la concentración de minerales; por ejemplo, a mayor contenido de minerales arcillosos del tipo de la montmorillonita mayor será la dilatación. Por la desecación el suelo se agrieta en direcciones múltiples y forma poliedros de formas diferentes. La relación entre dilatación por humedad y agrietamiento es directamente proporcional.

Durante los procesos de congelación del suelo el agua va penetrando en los poros y al solidificarse genera grietas. En la descongelación el agua poco a poco sale de las grietas donde se conservó y a veces separa la masa de los agregados. En cada nuevo ciclo de congelación y descongelación este proceso se repite continuamente, dando lugar a la separación de la masa del suelo en agregados.



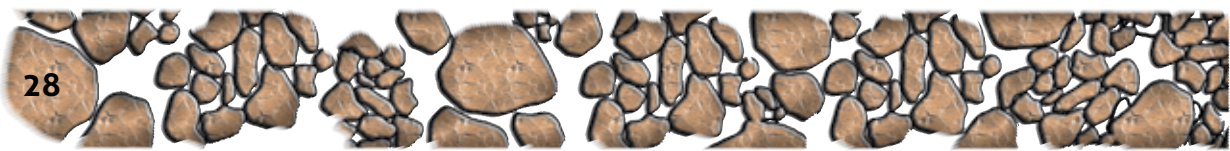
La consolidación de los agregados del suelo, su tamaño y estabilidad son el resultado de los materiales de cementación, los procesos de formación del suelo y el tamaño de los agregados iniciales. La compactación de los agregados se logra por la disminución de la porosidad en el proceso de la separación de la masa del suelo en agregados. En esto intervienen diferentes sustancias que pegan y unen las partículas del suelo.

Las principales sustancias que a manera de pegamento unen las partículas son: el humus, los minerales arcillosos, óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. De acuerdo con el modelo jerárquico de organización de los agregados, los macroagregados (>0.25 mm), están desarrollados por raíces e hifas en la mayoría de los casos, mientras que la formación de microagregados (<0.25 mm) está promovida por compuestos húmicos.

Al humus pueden agregarlo:

- * Los humatos de calcio, dan la estructura más estable en los horizontes húmicos, con estructura nuciforme o granular.
- * Los humatos de sodio, son los más lábiles y móviles, peptizan la masa del suelo, promoviendo su eslitocidad (término ruso que viene de slitii, que significa compacto-plástico, según el grado de humedad) y separación en agregados columnares.
- * Los humatos de hierro y aluminio, posibilitan la formación de estructura granular o terronosa en los suelos forestales, y también la prismatizada en los horizontes iluviales (de acumulación).
- * Los hidróxidos de hierro y aluminio, participan en la formación de la estructura nuciforme y prismática en los horizontes iluviales (en ausencia de sodio intercambiable).
- * Las células de los microorganismos vivos, que en horizontes húmicos adsorben intensamente las partículas del suelo.

El grado de cementación de los agregados estructurales depende de las sustancias cementantes, y de las composición mecánica y mineralógica del suelo. A mayor contenido de partículas arcillosas, más resistente serán los agregados del suelo. Las arcillas montmorilloníticas dan



una alta resistencia a los agregados; las caolinitas lo hacen en menor grado.

Una forma muy original de cementación resistente del suelo se observa para la eslitogénesis, y también muy cercano a esto para la solonetización, aunque esencialmente son diferentes por su naturaleza.

CLASIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

En los años 20 del siglo pasado, la estructura se clasificaba según el tamaño y la forma de disgregarse de los agregados y su tamaño. Con los estudios de Bennett y Allison (1928) se introdujo en Cuba el concepto de estructura fragmentaria, dividiéndose en fina, media y gruesa, según el tamaño de los agregados.

Esta concepción se manejó mucho por los especialistas de la antigua Dirección Nacional de Suelos y Fertilizantes del Ministerio de Agricultura de Cuba, sobre todo en las décadas de 1960 y 1970. Hoy día se tiene una clasificación de estructura acorde a los principios que se siguen en los manuales internacionales como el Soil Survey Manual y la Guía para Descripción de Suelos de la FAO.

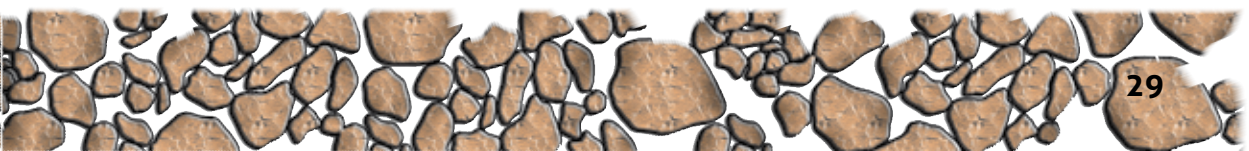
La clasificación de los diferentes tipos de estructura para los suelos de Cuba se presenta en el Manual para la Cartografía Detallada y Evaluación Integral de los Suelos, preparada en 1995 por especialistas del Instituto de Suelos y de la antigua Dirección Nacional de Suelos y Fertilizantes (Hernández et al, 1995).

La bibliografía internacional presenta tres formas diferentes de clasificar la estructura del suelo (véase figura 3): según su forma, de acuerdo con su tamaño y por su fragmentación.



Figura 3.

Formas de clasificar el suelo



Clasificación según su forma (morfología)

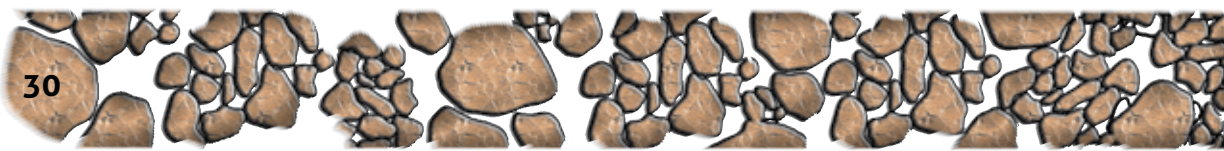
Según Zonn (1978), Cairo y Fundora (1994) y Hernández y colaboradores (2006), la morfología de la estructura del suelo depende de factores como: la textura, el tipo de arcilla, los cationes predominantes (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , Fe^{+3}); la capacidad de absorción del agua, la materia orgánica, y el manejo de la tierra. Estos autores dividen a los suelos en dos grupos: con estructura y sin estructura. Los primeros presentan agregados ordenados en un tipo de estructura definida, los segundos, pueden ser suelos arenosos pobres en materia orgánica y que no tienen desarrollo de estructura; o que tienen mucha arcilla, predominantemente del grupo de las esmectitas (arcillas del tipo 2:1); o que tienen mucho sodio cambiante, presentan un horizonte masivo sin estructura.

La clasificación de estructura de acuerdo con su forma es la siguiente (véase figura 4):



Figura 4.

Clasificación de la estructura del suelo por su forma.



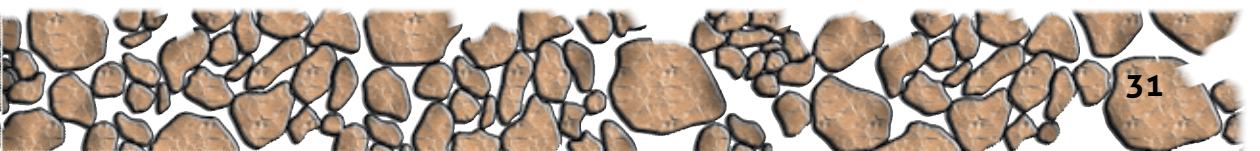


Sin estructura

- 1- **Grano simple:** al secarse cada grano de arena aparece separado uno del otro (suelos arenosos).
- 2- **Masiva:** el suelo está adherido entre sí por pequeñas cantidades de arcilla y materia orgánica, pero no existen líneas de separación definida (margas arcillosas o suelos salinos).

Con estructura

- 1- **Cúbica:** separaciones estructurales desarrolladas de manera uniforme en tres ejes.
 - 1.1- Bloques angulares y subangulares: separaciones de formas no uniformes con aristas y bordes poco expresados y con superficie de 3 a 10 cm. Se subdivide en grande, media y fina.
 - 1.2- Nuciforme: separaciones de formas uniformes, con aristas bien representadas; la superficie de las aristas es relativamente plana, los límites son puntiagudos, su tamaño es de 3 a 10 cm. Se subdivide en grande, media y fina.
 - 1.3- Granular: parecida en forma a la anterior, redondeada de 3 a 0,5 cm de tamaño. Se subdivide en grande o forma de chícharos, media o harinosa y fina o pulverulenta.
 - 1.4- Grumosa: igual que la de bloque, pero su tamaño es de 0.5 a 3 cm. Se subdivide en grande, grumosa y finamente grumosa.
- 2- **Prismática:** con partes de las separaciones principalmente desarrolladas en el eje vertical.
 - 2.1- Prismatizada: con la superficie plana frecuentemente pulida y brillante; vértices puntiagudos. Su tamaño va desde 1 a 5 cm hasta 30 cm.
 - 2.2- Columnar: de forma uniforme con las aristas verticales bien representadas, suaves con la base superior (cabeza) redondeada. Su tamaño es desde 3,5 cm hasta 20 cm.
- 3- **Enlosada:** con partes desarrolladas principalmente en los ejes horizontales.
 - 3.1- Enlosada estratificada: con planos horizontales más o menos desarrollados y soldados; con frecuencia coloreados y de formas distintas. Su tamaño es desde 1 mm hasta 5 cm.
 - 3.2- Escamosa o laminar: plana en forma de escamas separadas, con frecuencia con bordes afilados. Su tamaño es de 1 mm hasta 3 mm.



Clasificación por tamaño

- Terrón: masa de suelo de forma irregular y tamaño grande. Se origina al arar o excavar la tierra. Esas masas de suelo se aflojan o pierden cohesión con facilidad, al pasar por repetidas condiciones de humedad y desecación.
- Grumo: agregado natural rico en materia orgánica y muy dependiente de la actividad biológica. Es redondo, poroso, de dimensiones menores a 10 mm. Su tamaño óptimo en la capa superficial de suelo en relación con el desarrollo de las plantas es de 1 a 5 mm.
- Gránulo: agregado pequeño de diámetro menor a 0.2 mm, con elementos muy estables.

Clasificación de acuerdo con la fragmentación

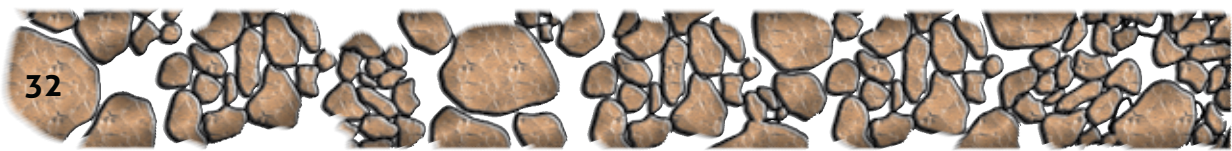
El grado de fragmentación de campos agrícolas depende del tipo y porcentaje de arcilla presente, de los cationes predominantes, así como del contenido de materia orgánica.

- Fragmentación gruesa: característica de los suelos con alto contenido de arcillas (tipo 2:1), plástico-compactos.
- Fragmentación media: Es propia de aquellos suelos donde, a pesar de predominar arcillas del tipo 2:1, existe la influencia del calcio y la materia orgánica amortigua la cohesión.
- Fragmentación fina: Existe en los suelos donde predominan minerales arcillosos del tipo 1:1 o arcillas hidróxidos, donde el hierro realiza una función determinante en la forma de fragmentación de la estructura. Esta estructura se puede observar en los suelos Ferralíticos rojos.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Método morfológico para evaluar la estructura del suelo

Es un método subjetivo, el edafólogo lo perfecciona con el tiempo, pues se basa en la observación durante la descripción del perfil, sus componentes y tamaño. En los suelos bien estructura-



dos está presente una buena actividad biológica y una fertilidad adecuada; por el contrario, en los mal estructurados o sin estructura, hay poca actividad biológica y la fertilidad es deficiente.

Los resultados obtenidos en los últimos años (Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas de Cuba, INCA) en investigaciones sobre el cambio de las propiedades de los suelos Ferralíticos rojos lixiviados por el cambio de uso del suelo (Hernández *et al*, 2006; Morell *et al*, 2006; Morales *et al*, 2008) muestran que un suelo bien estructurado continuamente labrado, sin aplicarle abonos orgánicos, pierde la estructura inicial para transformarse en agregados grandes y compactos.

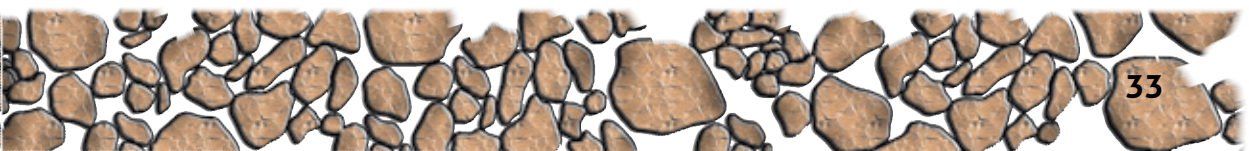
Método de la estabilidad estructural

Este método analiza los agregados del suelo en tamices secos y húmedos (método de Savinov, citado por Orellana *et al*, 1990) de diferentes diámetros (10, 7, 5, 2, 1, 0.5 y 0.25 mm). Grosso modo el procedimiento es el siguiente (véase figura 5):



Figura 5.

Método de Savinov para obtener el índice de agregación del suelo.



Método para obtener el índice de agregación del suelo

1. Toma de la muestra de suelo. En cada horizonte del suelo que se desea analizar se introduce una lata metálica de hoja fina y se toma la muestra de suelo sin perturbarlo, lo más natural posible.
2. Las muestras se llevan al laboratorio y se ponen a secar disgregando suavemente los macroagregados. Una vez secas las muestras se disgregan mejor los agregados y se comienza el estudio en tamiz seco inicialmente y en tamiz húmedo después.
3. Paso por tamiz seco, mediante un motorcito acoplado al equipo se mueve el juego de tamices durante 20 minutos. Al terminar se separan los tamices y se pesan los agregados; se determina el porcentaje de agregados retenidos en cada tamiz empleando la siguiente fórmula

$$\% = \left(\frac{\text{peso en un tamiz}}{\text{peso en todos los tamices}} \right) \times 100$$

4. Paso por tamiz húmedo, se emplea el mismo método que en el paso anterior pero utilizando un tamiz húmedo.
5. Tabulación de resultados, Los datos obtenidos en los pasos 3 y 4 se vacían en una tabla para comparar el tamaño de los agregados y sus cantidades
6. Obtención del índice de agregación del suelo mediante cálculo. Este índice se determina por la fórmula del índice de estabilidad de la estructura del suelo:

$$K = \frac{\alpha}{\beta}$$

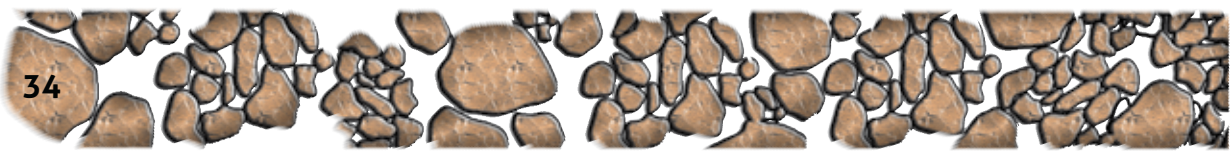
Donde:

K = índice de estabilidad estructural

α = cantidad de agregados de los tamices de tamaño entre 0,25 y 7 (10) mm

β = suma de agregados de los tamices mayores de 10 mm y menores de 0,25 mm

Valores mayores del índice indica que el suelo tiene mejor estructura; esto es, en suelos donde los agregados son muy grandes (>7 ó 10 mm;< 0.25 mm), el suelo tiene estructura muy mala, o carece de ella (con agregados <0.25 mm).





Con el análisis de estabilidad estructural se obtienen tres indicadores:

* Coeficiente de estabilidad en tamiz seco

$$K_{es} = \frac{\sum \% \text{ Ag. } (0.25 - 10.00)}{\sum \% \text{ Ag. } < 10.00 > 0.25}$$

* Coeficiente de estabilidad en tamiz húmedo

$$K_{eh} = \frac{\% \text{ Ag. } < 0.25}{\sum \% \text{ Ag. } > 0.25}$$

* Índice de estabilidad estructural

$$I_e = \frac{\sum \% \text{ Ag. } > 0.25 (Th)}{\sum \% \text{ Ag. } > 0.25 (Ts)}$$

Donde:

% Agregados= Porcentaje de Agregados

Th = Tamiz húmedo

Ts = Tamiz seco

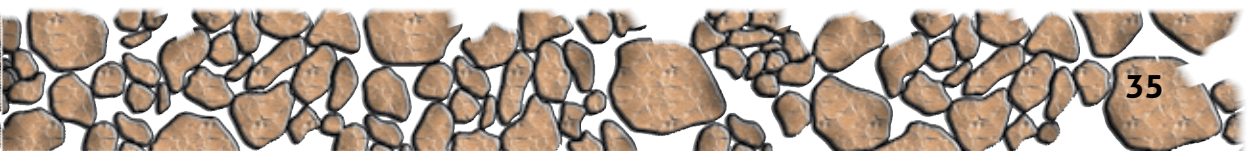
Keh= Coeficiente de estabilidad estructural en tamiz húmedo

Kes= Coeficiente de estabilidad estructural en tamiz seco

Ie= Índice de estabilidad estructural

Método indirecto del coeficiente de dispersión

Este método, conocido como análisis de microagregados, se fundamenta en la relación entre el porcentaje de arcilla en las fracciones mecánicas con dispersante y sin él; es decir, es la relación (en forma de coeficiente) entre la cantidad de arcilla que se encuentra en el análisis de microagregados (sin tratamiento químico) y en el análisis mecánico (con tratamiento químico). Al labrar un suelo, la materia orgánica se pierde por mineralización, erosión o empobrecimiento (lavado lateral de la arcilla), se rompen los microagregados del suelo y la arcilla que se encontraba en ellos queda dispersa en el suelo. Por esto, cuanto más labrado está un suelo,



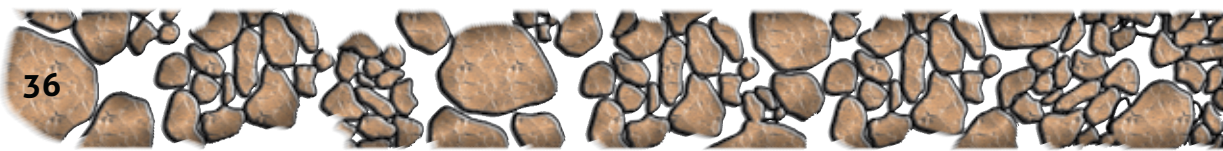
el coeficiente (o factor) de dispersión es mayor, dando una idea indirecta de la deficiente estructura del suelo.

Para los suelos Ferralíticos rojos lixiviados éútricos (Nitisoles ferrálicos ródicos éútricos, arcillosos), se ha observado (véase tabla 2) que el coeficiente de dispersión está acorde con el grado de degradación del suelo (Hernández *et al*, 2008).

Tabla 2.

Valores del coeficiente de dispersión de suelos Nitisoles ferrálicos líxicos (Ferralíticos rojos lixiviados) según su estado estructural.

Estado del suelo	Coeficiente de dispersión	Estado estructural
Patrón Forestal Conservado	<15	Suelo bien estructurado, con estructura granular
Frutales de muchos años	15-20	Suelo bien estructurado, con estructura granular
Poco degradado Cultivo con bueyes	20-25	Suelo con estructura terronosa y de bloques subangulares pequeños (3-5 cm de tamaño)
Medianamente degradado Cultivo algo intensivo	25-35	Suelo con estructura de bloques subangulares pequeños (3-5 cm) y medios (5-7 cm)
Degradado Cultivo muy intensivo	>35	Suelo con horizonte BA en superficie y estructura de bloques medios (5-7 cm) y grandes (> 7 cm)



TIPOS DE ESTRUCTURA DE LOS PRINCIPALES SUELOS TROPICALES

Para identificar y clasificar la estructura de los suelos se sigue el procedimiento establecido en la mayoría de los manuales de descripción de perfiles, como el de la FAO, *Soil Survey Manual*, o el Manual para los suelos de Cuba. En ellos se tipifica la estructura del suelo según la disposición espacial de los agregados en los ejes x, y, z, o sólo en uno de ellos (horizontal o vertical).

Estructura del suelo por formación de agregados orientados en los tres ejes (x, y, z)

- * Nuciforme: Con agregados redondeados que se fragmentan en pedacitos parecidos a la nuez (véanse figuras 6 y 7).
- * Granular: Con agregados redondeados, que se mantienen en forma de gránulos.

Ambos tipos de estructura se presentan en suelos con alto contenido de materia orgánica (propios del proceso de humificación); en los horizontes superiores de los suelos que tienen contenidos adecuados en materia orgánica y es típico en suelos Pardos y Húmicos Calcimórficos. Se diagnostica como horizonte mullido o mólico; en los suelos Ferralíticos y Ferríticos, cuando tienen un contenido en materia orgánica mayor de 4% (véase figura 6).



Figura 6.

Estructura Nuciforme granular de un suelo Feozem (Pardo mullido sobre roca ultrabásica), del sur de la provincia Las Tunas, Cuba.



Figura 7.

Estructura Nuciforme granular en suelo Gleysol plintítico, mólico (húmico, endoacrílico) Gley nodular ferruginoso petroférico, de la región de Los Palacios, de la llanura de Pinar, Cuba.

Figura 8.

Estructura granular de un suelo Nitisol ferrálico (Ferralítico rojo lixiviado) de San José de las Lajas, provincia Habana, Cuba.



- * Terronosa: Es un tipo de estructura propia de suelos arenosos, mal estructurados, puede formarse por la degradación de las estructuras nuciforme o granular, causada por la labranza intensiva sin aplicaciones de abonos orgánicos.

Al igual que la nuciforme o granular posee agregados pequeños pero con ángulos. Se puede manifestar en Arenosoles y en Alfélicos de textura ligera o en el horizonte A de suelos Ferralíticos cuando están muy cultivados (véase figura 9).

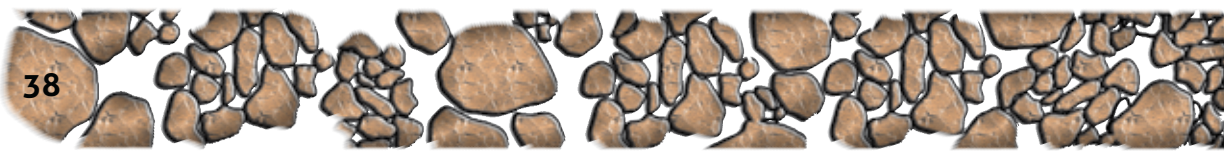




Figura 9.

Estructura terranosa en un suelo Acrisol (Alítico de baja actividad arcillosa) en la región de la Palma, provincia de Pinar del Río, Cuba.



Bloques subangulares: Propia de los horizontes B, de suelos Ferralíticos, Ferrálicos, Fersialíticos y Pardos (véanse figuras 10 y 11). Cuando aparece en superficie, indica que el suelo perdió el horizonte A o que en superficie hay una mezcla de restos del horizonte A con el horizonte B. Estructura orientada en los tres ejes, normalmente tiene tamaño mínimo de 5 cm.



Figura 10.

Estructura de bloque subangular en el horizonte Bt de un suelo Nitisol ferrálico líxico (éutrico, róxico; Ferralítico rojo lixiviado), de la región de San José de las Lajas, provincia Habana, Cuba.

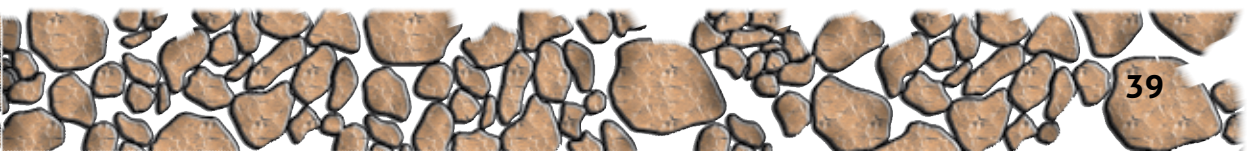




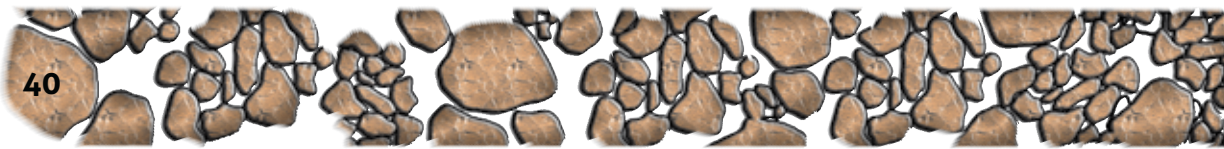
Figura 11.

Estructura de bloque subangular en un horizonte superficial AB de un suelo Nitisol ferrálico líxico dísitrico, ródico (Ferralítico rojo lixiviado) degradado de la región de la Palma, provincia de Pinar del Río, Cuba.

- * Bloques angulares: es una estructura de los horizontes B, principalmente en suelos de textura gruesa y pobres en materia orgánica; o en suelos arcillosos un poco degradados. Puede aparecer en superficie debido a la pérdida del horizonte A o por degradación de la estructura de bloques subangulares (véase figura 12).

Figura 12.

Estructura de bloque angular de un horizonte Bt de un Nitisol ferrálico, líxico éutrico, ródico (suelo Ferralítico rojo lixiviado) de San José de las Lajas, provincia Habana, Cuba.



Estructura del suelo por formación de agregados orientados en el eje vertical (y)

- * Prismática: Propia de suelos arcillosos ricos en arcilla del tipo 2:1 (esmectitas), dilatables, o en suelos arcillosos con metahaloisita. Son típicos de los Vertisoles o suelos con propiedades vérticas, que caracterizan subtipos vérticos (véanse figuras 13, 14 y 15)



Figura 13.

Bloques prismáticos del horizonte C de un suelo Vertisol Pélico mullido del Monte Naranjito, sureste de la provincia Las Tunas, Cuba.

Figura 14.

Bloque prismático con caras de deslizamiento del horizonte B de un Vertisol cálcico (Vertisol Pélico) de la Finca La Rosita, en Campo Florido, provincia Ciudad Habana, Cuba.





Figura 15.

Aspectos de los bloques prismáticos del Vertisol calcálico (pélico) .

- * Columnar: Tipo de estructura con cierta curvatura en sus extremos, formando columnas en el horizonte B de suelos Sódicos o Solonetz (véanse figuras 16 a 19).

Figura 16.

Estructura columnar de un Solonetz enterrado en la zona del Monte Naranjito, sureste de la provincia Las Tunas, Cuba.



Figura 17.

Estructura prismática columnar de un área baja en Pedro Pi, provincia Habana, en suelo Cambisol (Pardo esfítico medianamente lavado).



Figura 18.

Estructura columnar de un Solonetz en la finca de Lino, Surgidero de Batabanó, La Habana.

Figura 19.

Tipo de estructura columnar propia de los suelos Solonetz o suelos Sódicos. Encima de la estructura columnar se observa el horizonte A2 alábico (tomada del libro Keys to Soil Taxonomy de Soil Survey Staff, 2003).



- * Poliédrica: Se forma en suelos lixiviados, agregados orientados en el eje b, de 5 a 10 cm de largo. El término proviene de los vocablos *poli* (mucho) y *hedros* (lados), por tanto este tipo de estructura tiene muchos lados y con revestimientos (llamados cutanes) que se manifiestan en los costados del agregado. En Cuba, este tipo de estructura se presenta típicamente en suelos Ferralíticos Rojos compactados (Camacho, 1982), aunque puede presentarse en Ferralíticos rojos lixiviados (véanse figuras 20 y 21).

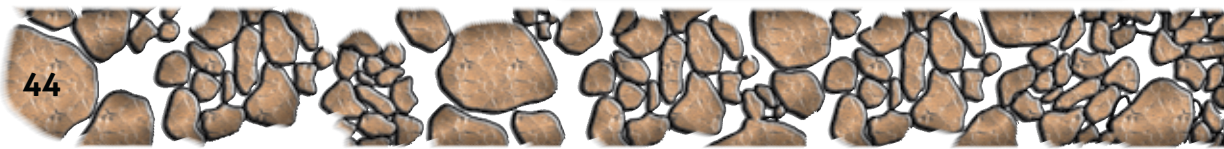


Figura 20.

Estructura poliédrica fina en horizonte Bt de suelos Nitisoles ferrálicos (Ferralíticos Rojos Lixiviados) de la Finca de Bernardo, en San Antonio de los Baños, Cuba.

Figura 21.

Estructura poliédrica gruesa de suelo Ferralítico Rojo compactado de la región de Batabanó, provincia Habana, Cuba.



Estructura del suelo por formación de agregados orientados en el eje horizontal (x)

Se forman en suelos de regiones áridas y semiáridas, aunque también pueden presentarse en regiones tropicales, ya sea por condiciones de relictos edáficos (como es el caso de suelos Salinos o Solonchaks) o por degradación, sobre todo en suelos ferralitizados. Los tipos de estructura de agregados orientados en el eje horizontal pueden ser de dos formas:

- * **Laminar:** se presenta en suelos de regiones de clima árido y semiárido; también bajo clima tropical subhúmedo seco. Es propia del horizonte superficial, principalmente en suelos Salinos (Solonchaks) y Sódicos (Solonetz).
- * **Enlosada:** puede encontrarse en el horizonte A de suelos Salinos (Solonchaks) y Sódicos (Solonetz) formados en clima árido y semiárido; también en suelos tropicales como los Ferrálticos y Ferrálicos por influencia antropogénica (véase figura 22).

Suelo sin estructura

Figura 22.

Perfil de suelo Nitisol ferrálico (Ferráltico rojo lixiviado) de la Finca Bárcenas, en Batabanó, provincia Habana, Cuba. Obsérvese la estructura enlosada en superficie como resultado de la acción antropogénica por el cultivo.



Por influencia antropogénica o climática hay ocasiones en que el suelo no tiene una estructura definida. Para este caso se han determinado dos variantes:

- * **Sin estructura, con grano simple,** suelos perturbados por la preparación de tierra en los cuales no hay una estructura definida, o Arenosoles cultivados con muy poco contenido en materia orgánica (véase figura 23).

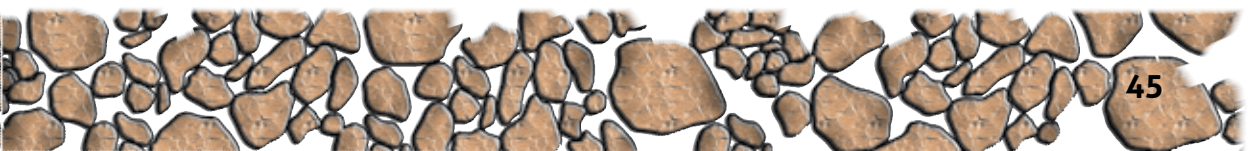




Figura 23.

Suelo Arenosol en la zona de barras de la llanura costera norte de Nayarit, México.

- * Sin estructura definida masiva, Vertisoles en estado húmedo en que se dilatan los bloques prismáticos o Solonchaks en estado húmedo los que se dispersan por el sodio y se dilatan (véase figura 24).

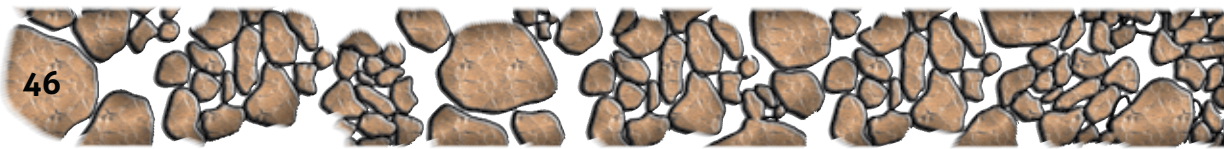
Figura 24.

Perfil de suelo Solonchak, sin estructura definida, masiva. Perfil tomado en el Valle de Guantánamo, provincia Guantánamo, Cuba.



INFLUENCIA ANTROPOGÉNICA POR EL CULTIVO CONTINUO (INFLUENCIA AGROGÉNICA) EN LA DEGRADACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

En la ruptura o pérdida de la estructura del suelo intervienen la microagregación, la biomasa y diversidad microbiana, y el manejo irracional (Lupwayi *et al*, 2001; Green *et al*, 2007; Noellemyer, 2008). La degradación es producida por el uso continuo del arado en el suelo que rompe los agregados con efectos difícilmente reversibles (Durodoluwa *et al*, 1999; Hernández *et al*, 2006; Whalen *et al*, 2006). El proceso tiene mayor intensidad en las regiones tropicales (Hernández *et al*, 2009).





El suelo Solonchak es un suelo propio de las regiones áridas y semiáridas, pero también puede formarse en las llanuras costeras de regiones tropicales subhúmedas (sobre todo con lluvias anuales menores de 1200 mm). Se le encuentra cerca de las costas Cubanas (véase figura 24) y en la llanura costera norte de Nayarit, México (Bojórquez *et al*, 2006; Ontiveros, 2008). En este caso el suelo Solonchak también se presenta sin estructura, teniendo una formación “masiva” la masa del suelo, sin agregados determinados (véanse figuras 25, 26 y 27).

Figura 25.

Perfil de suelo Solonchak, sin estructura definida, masiva. Perfil tomado en la zona de barras, en la llanura costera norte de Nayarit, México (tomado de Ontiveros, 2008).

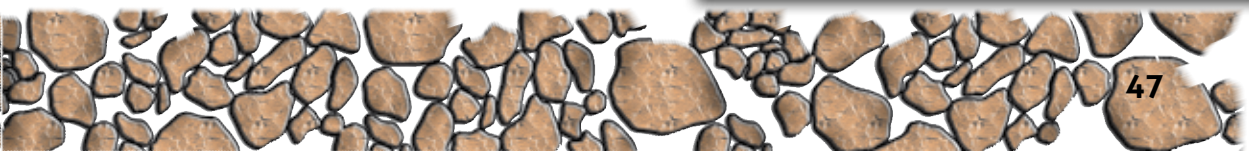


Figura 26.

Calva salina con costra de sales en superficie. Tomado en la zona de barras, en la llanura costera norte de Nayarit, México (tomado de Ontiveros, 2008).

Figura 27.

Calva salina en forma de cresta, con sales en superficie (se clasifica este tipo de formación con el calificativo puffic, según la base referencial mundial del Recurso Suelo (WRB). Fotografía de la zona de barras, en la llanura costera norte de Nayarit, México (tomado de Ontiveros, 2008).



Prácticas agrícolas como deforestación y quema, uso intensivo de agroquímicos (fertilizantes y pesticidas), aplicación de maquinaria (con equipos cada vez más pesados y sofisticados) y el propio riego se han hecho sin considerar las propiedades del suelo, lo que ha provocado cambios en la estructura, e incluso, la degradación del suelo.

Las operaciones que se realizan para cultivar son la causa principal de la pérdida de la estructura del suelo. Noellemeyer (2008) encontró que las pérdidas de carbono debido al cultivo en suelos vírgenes, en la Argentina, son del orden de 10 a 55%; otros investigadores (Elberling *et al*, 2003; Zach *et al*, 2006) han reportado pérdidas de carbono que varían entre 35 a 56% en suelos con 3 a 5 años de cultivo en diferentes regiones semiáridas.

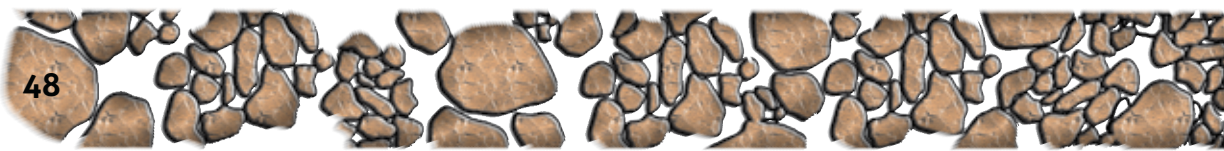
Las prácticas agrícolas influyen en la cantidad y persistencia de los agentes cementantes. Por ello, la agregación del suelo puede ser utilizada para evaluar si el suelo es capaz de mantener un buen estado de agregación sin la adición de materia orgánica (Durodoluwa *et al*, 1999). Para cuantificar la efectividad de las prácticas de manejo agrícola y para seleccionar aquellas que optimizan un buen rendimiento de los cultivos y minimizan la pérdida de nutrientes (Whalen *et al*, 2006)


El impacto que la preparación del suelo tiene, en regiones tropicales, sobre las propiedades biológicas ha sido demostrado por numerosos investigadores. El arado dispersa mecánicamente los mejores agentes cementantes del suelo: por lo que se desagregan mecánicamente los agregados y los fragmentos de las raíces e hifas micorrízicas (Lupwayi *et al*, 2001; Roldán *et al*, 2005 y Whalen *et al*, 2006).

De acuerdo con Wright y colaboradores (2004); Hernández y colaboradores (2006a, 2006b); y Morell *et al* (2006), los procesos de manejo inadecuados de suelos llevan a la destrucción de la estructura de la capa superior del perfil de suelo (que es nuciforme granular en condiciones naturales o conservadas), que cambia a subangular (en ocasiones con presencia de bloques prismáticos en superficie) por el cultivo intensivo. Cuando el suelo se está preparando para la siembra con el arado los bloques prismáticos ascienden a la superficie y se presenta en ella una mezcla de agregados finos (incluso polvo), con bloques prismáticos y subangulares (muy duros y compactos).

Este proceso de degradación del horizonte húmico ocurre de la siguiente forma: con el cultivo intensivo, la estructura del suelo se degrada, se rompen los microagregados y aumenta el factor de dispersión. La arcilla dispersa puede seguir uno estos caminos:

- * se lixivia a través del interior del perfil.
- * se lava lateralmente



- 
- * sella los poros del suelo y poco a poco va formando bloques prismáticos de 10 a 20 cm. Conjuntamente se forma un piso de arado en la parte superior del horizonte argílico (Bt).

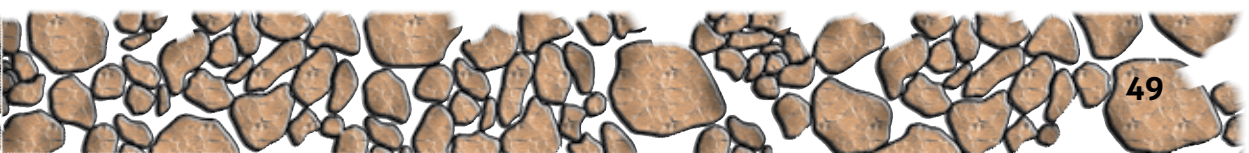
Frey *et al* (1999) investigó la masa fúngica con diferentes métodos de preparación del suelo. Reportó que la longitud de las hifas es 1.9 a 2.5 veces mayor en la superficie del suelo (0 a 5 cm) cuando no se preparó a la variante del suelo preparado. La proporción de hongos en la biomasa microbiana varía de 10% a 60% y es mayor en un suelo no labrado. El laboreo del suelo acelera la descomposición de la materia orgánica y reduce el contenido de carbono por la participación de los microorganismos en la destrucción de los agregados (Balesdent *et al*, 2000).

Independientemente de la labor destructiva mecánica que implica la preparación del terreno, con la entrada de mayor cantidad de oxígeno y humedad al suelo (factor climático) se acelera la actividad biológica en residuos orgánicos y humus, y se libera una buena cantidad de carbono que se oxida y mineraliza ascendiendo a la atmósfera en forma de CO₂.

La descomposición incrementada de compuestos de MOS, que pueden servir de otra manera como agentes cementantes, puede a su vez, disminuir la agregación. Wright y Anderson. (2000), Wright y colaboradores (2007) reportan que, comparado con el manejo de labranza, el sistema no cultivado incrementó la agregación del suelo, produjo altas concentraciones de carbono y nitrógeno en microagregados, almacenó mayor cantidad de carbono orgánico en el suelo y nitrógeno orgánico en la profundidad (0 a 15 cm). Esto demuestra que un sistema de manejo reducido, o de no labranza, puede mejorar o desarrollar la agregación del suelo, incrementar la infiltración y revertir las pérdidas de materia orgánica a través de la actividad biológica (Beare *et al*, 1997).

Simard (1997), y colaboradores, estudió por tres años un suelo Inceptisol húmico y encontró que no hay discrepancias en el carbono orgánico del suelo (COS) con diferentes tipos de manejo (labranza mínima, cincel, y labranza tradicional); sin embargo, los niveles de nitrógeno total, el potencialmente mineralizable y de carbono de la biomasa microbiana fueron significativamente mayores con el sistema de labranza mínima. Para muchos suelos tropicales a largo plazo pueden ser observadas diferencias en COS debido al sistema de manejo; Es decir, los indicadores biológicos del suelo, (como nitrógeno mineralizable y biomasa microbiana del suelo), son más sensibles al manejo que al COS.

Para la estructura del suelo resulta una gran contradicción, por los daños que provoca, emplear maquinaria (cada vez más potente y pesada) para acondicionar el suelo y lograr el desarrollo óptimo de los cultivos. Lejos de crear una capa arable, esponjosa, friable y porosa que



facilite la penetración de las raíces y la circulación del agua y el aire, estos métodos de laboreo, traen serios problemas (que hemos explicado): el incremento de la densidad de volumen y la compactación.

Para Hernández y colaboradores (2006) la preparación del suelo debe llevarse a cabo en condiciones óptimas de humedad que coinciden con la humedad de ruptura capilar y la máxima formación de agregados de valor agronómico. Este nivel de humedad, donde prevalece el agua retenida débilmente (entre 70% y 80 % de la capacidad de campo) coincide con la susceptibilidad máxima del suelo a la compactación.

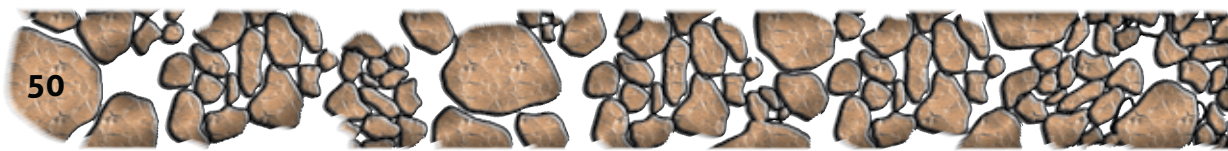
En los países tropicales de América Latina, ya sea por la explotación agrícola en el tiempo del colonialismo español y postcolonial del capitalismo, estos problemas no se atendieron. Esto ocasionó que la influencia antropogénica redujera en forma considerable el contenido en materia orgánica de los suelos. El Instituto de Suelos (2001) señala que actualmente en Cuba el 69.6% de las tierras (4.66 millones de hectáreas) tienen un contenido muy bajo de materia orgánica (menos de 2%), que indica que los suelos están mal estructurados.


Debido a esta situación en 1990, en Cuba, comenzó una nueva etapa en la agricultura conocida como agroecológica. Se buscaron abonos orgánicos y se desarrollaron biofertilizantes. Se creó el Programa Acelerado de Producción de Materia Orgánica que culminó en 2007 con la producción de 6 millones de toneladas de humus de lombriz, 12 millones de toneladas de composta y 48 toneladas de biofertilizantes.

Desafortunadamente, paralelo a este programa, no se desarrollaron estrategias para la búsqueda de aplicaciones eficientes de abonos orgánicos a la agricultura que incluyeran los tipos de suelo y los cultivos y hoy en día prácticamente hay fórmulas muy generales para la aplicación de los compuestos orgánicos al suelo. Tampoco se creó un programa para medir el cambio que la cantidad y tipo de abono orgánico generaría en las propiedades del suelo.

Es muy difícil (y subjetivo) hacer una evaluación visual de la estructura del suelo y su posible mejoramiento. Inicialmente hay que observar cuatro propiedades: la densidad aparente, la porosidad total, el coeficiente de marchitez y la estabilidad estructural. El monitoreo de la densidad aparente y de la porosidad total debe realizarse trimestralmente; las otras dos, al final del experimento. Si se carece del equipo para hacer la estabilidad estructural las otras determinaciones (más sencillas) darán una idea del mejoramiento al considerar la disminución porcentual del valor inicial de la densidad aparente y del aumento porcentual de la porosidad total. Si hay un mejoramiento notable con el tratamiento agroecológico debe haber una disminución en el factor de dispersión del suelo y un ligero aumento en el contenido de carbono en el suelo (que representa a su vez un aumento de la materia orgánica).

Para evaluar la estructura y el mejoramiento del suelo (Hernández *et al*, 2006) deben monito-





rearse las propiedades más lábiles (las que cambian con mayor rapidez por la acción antropogénica). Con datos climáticos puede elaborarse una modelación matemática de la evolución de las propiedades de los suelos con diferentes tipos de manejo e incluirse el rendimiento de la cosecha.

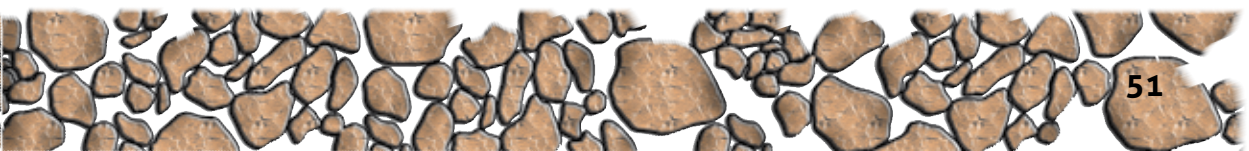
En Cuba, la Asociación Cubana de Técnicos Agrícolas y Forestales (ACTAF) está haciendo un gran esfuerzo para encontrar soluciones agroecológicas más eficaces. Para esto ha emprendido acciones como:

- * Talleres con investigadores y productores (tanto estatales como particulares)
- * Eventos desde la base hasta el nacional de Agricultura Orgánica
- * Apoyo a proyectos que busquen soluciones de agricultura orgánica
- * Apoyo a publicaciones relacionadas con la temática
- * Divulgación de resultados de investigaciones y de producción a través de la Revista de Agricultura Orgánica.

Estamos seguros que en un plazo no muy lejano, la agricultura contará con métodos eficientes de manejo sostenible de los suelos que resuelvan el problema de la degradación de los suelos.

Ejemplos de degradación del suelo y cambio de estructura en ecosistemas Tropicales

En los ecosistemas tropicales la acción antropogénica por el cultivo continuado, y a veces intensivo, conlleva rápidos cambios en el contenido en materia orgánica del suelo (y del carbono) y otras propiedades relacionadas con ella. A continuación presentamos tres ejemplos de estas transformaciones en los suelos, una en Cuba, las otras en México.



Degradación del suelo Nitisol ferrálico (éutrico, ródico, arcilloso), de la "llanura roja" de la Habana, Cuba

Hernández y colaboradores (2009), como parte de los trabajos de diagnóstico, presenta indicadores para la degradación de los suelos rojos de la llanura de La Habana² que ocupan 195 000 ha (Instituto de Suelos, 2004), y son de los más productivos de Cuba.

Presentamos a continuación 5 perfiles de suelos (véanse fotos 28 a 36) Ferralíticos Rojos Lixiviados (según la clasificación de suelos de Cuba; Hernández *et al*, 1999) (tomado de Borges, 2003, Hernández *et al*, 2006, 2008; Morell *et al*, 2008 y Morales *et al*, 2008) que tienen diferentes estructuras en el horizonte A, debido al uso agrícola.



Figura 28.

Uno de los perfiles patrones tomados de estos suelos bajo arboleda de Ficus de más de 100 años, en terrenos del INCA.

Figura 29.

Estructura nuciforme granular en el horizonte A, húmico del suelo patrón.



² Clasificados también como Nitisoles ferrálicos, líxicos, por WRB, 2008 y Ferralíticos Rojos Lixiviados por la clasificación de suelos de Cuba (Hernández *et al.*, 1999).

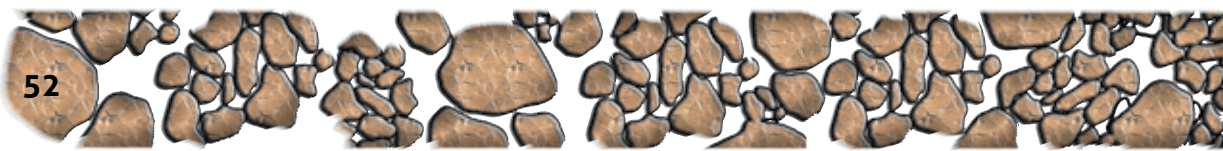




Figura 30.

Perfil de suelo conservado bajo frutales de cítricos de 30 años, en la finca Las Papas, del INCA.

Figura 31.

Estructura nuciforme buena en el horizonte A de una plantación de mango de un suelo FRL conservado.



Figura 32.

El mismo suelo, poco degradado, con cultivos de hace 10 años, en la finca El Mulato, cerca de Tapaste, provincia La Habana, Cuba.

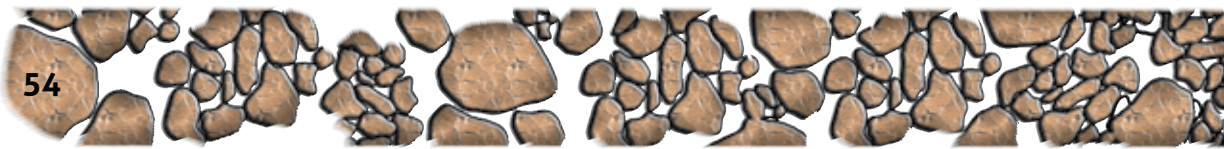
Figura 33.

Suelo Ferralítico rojo lixiviado hidratado, medianamente degradado, cultivado de hace 10 años, en la finca El Mulato, cerca de Tapaste, provincia La Habana, Cuba.



Figura 34.

Perfil de suelo Nitisol ferrálico, degradado, con piso de arado y bloques en superficie. Finca Las Papas, provincia La Habana, Cuba.



Las investigaciones se realizaron en 32 perfiles de suelo: cuatro perfiles patrones (bajo arboledas de muchos años), 12 bajo plantaciones de frutales o pastizales (conservados) y 16 de

Figura 35.

(A) Estado del suelo Nitisol ferrálico degradado, sembrado de boniato (camote), con bloques en superficie. Finca Las Papas, provincia La Habana, Cuba.
(B) Piso de arado en este suelo con una vista desde arriba, perpendicular a la superficie del suelo.



Figura 36.

Estructura granular muy buena, tomado en el horizonte A (húmico acumulativo) de un suelo patrón (Nitisol ferrálico), bajo el bosque a la entrada del Instituto de Investigaciones Fundamentales de la Agricultura Tropical, del MINAG, Ciudad Habana, Cuba.

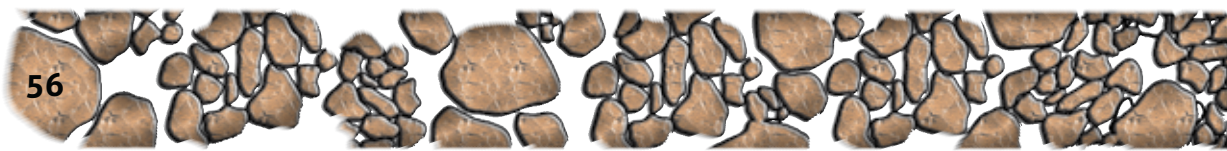
cultivo permanente en los últimos 30 ó 40 años. Los indicadores de la degradación para los diferentes suelos de Nitisol ferrálico líxico éútrico, ródico (Ferráltico rojo lixiviado éútrico) son:


Tabla 3.

Indicadores de la degradación para los diferentes suelos de Nitisol ferrálico líxico éútrico, ródico

Suelo	Suelo Nitisol ferrálico, líxico (Ferráltico rojo lixiviados; FRL) patrón	Suelo Nitisol ferrálico, líxico (FRL) conservado	Suelo Nitisol ferrálico, líxico (FRL) degradado
Tipo de perfil	O - Ah - Bt - C	A ó Ah - Bt - C	A - Bt - C ó BA - Bt - C ó BA - Btpa - C
Estructura horizonte A y Bt	En A granular; en B _t bloques subangulares (5 cm)	A, granular y nuciforme; en Bt bloques subangulares (5 a 7 cm)	Bloques subangulares y bloques prismáticos
Contenido en MO	Muy alto, > 6%	± 4% (3.5 - 4.5%)	< 2 a 3%
Factor de dispersión	De 10 a 15	De 15 a 20	> 20, máximo 40 a 50%
Densidad aparente	En el horizonte A entre 0,9 y 1,0 Mg m ³ ; en el Bt entre 1.0-1.05 Mg m ³	En A de 1.0-1.10 Mg m ³ ; en Bt 1.05-1.15 Mg m ³	> 1,10 Mg m ³ , máximo 1,25 - 1,30 Mg m ³ , sobre todo en el horizonte Bt
Actividad micorrízica	Alta tanto por la cantidad de esporas como por la producción de glomalina	Con reducción en la producción de esporas	Baja, tanto por la cantidad de esporas como por la cantidad de glomalina producida.

Actualmente se trabaja con la variante de suelo FRL degradado en buscar diferentes integrados que permitan identificar tres variantes de este tipo de suelo: poco degradado, medianamente degradado y fuertemente degradado.





Hay que considerar que los suelos FRL de las provincias Habana y Matanzas han estado sometidos durante casi dos siglos a la producción agrícola. Es decir, la influencia antropogénica ha sido intensa en estos suelos y debían presentar un grado mayor de degradación. Estos suelos son de los mejores del mundo, en cuanto se ponen en condiciones adecuadas de producción agrícola hay una buena respuesta productiva. En esto influye la cantidad de hierro libre en el perfil pues aunque hay degradación de la estructura el hierro libre no permite que se destruya por completo (Agafonov, 1981; Delgado, 1987).

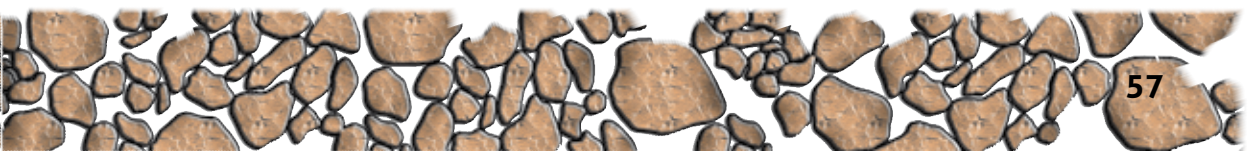
La problemática de la degradación del suelo por la influencia del cultivo intensivo que genera el cambio de la estructura del suelo y otras propiedades, se conoce como evolución agrogénica (Shishov *et al*, 2004; Tonkonogov *et al*, 2005; Hernández *et al*, 2009; Dubrovina, 2009) y frecuentemente ocurre con mayor intensidad en suelos de ecosistemas tropicales. Los impactos en cada suelo dependen de una serie de factores como el relieve, el tipo de suelos, la cantidad de arcilla y su composición mineralógica.

La clasificación actual de suelos considera el impacto del hombre por la agricultura intensiva (uso y manejo del suelo) para categorizar los suelos. Este aspecto se presenta en la clasificación nueva de suelos de Rusia (Shishov *et al*, 2004), en la Taxonomía China (CRGCST, 2001) y en la última versión del World Reference Base (UICS, Grupo de Trabajo de la WRB, 2008).

Degradación del suelo Feozem y su cambio a Cambisol en la llanura costera norte de Nayarit, México

En el ecosistema de la llanura costera norte de Nayarit, con una extensión próxima a 400 000 ha y un fondo agrícola alrededor de 200 000 ha, la formación inicial del suelo es Feozem con una estructura muy buena. Por más de 40 años se ha empleado para agricultura intensiva (con mecanización, aplicación de fertilizantes y pesticidas) y se ha transformado en Cambisol por destrucción de la materia orgánica y pérdida del carbono y de la estructura original del suelo. Aquí está ocurriendo un problema que es el siguiente: En la formación de la estructura del suelo hay dos factores decisivos que convergen: el biológico (con la acumulación de materia orgánica, que da lugar a una estructura buena) y el climático.

Con la producción agrícola de las tierras disminuye la materia orgánica del suelo y se rompen los agregados estructurales del suelo. Como el factor climático continúa incidiendo ya no hay regulación equilibrada del flujo de humedad que se requiere para la evapotranspiración del suelo y se rompen (vertical y horizontalmente) los capilares. Paulatinamente se forman agregados cada vez más grandes, hasta formar bloques tipo prismáticos que pueden llegar a 15 cm.



En la llanura norte de Nayarit el problema es muy marcado, con pérdidas de carbono de suelo que oscilan entre 30% y 60% y la transformación de Feozems a Cambisoles. Este tipo de transformación al parecer está muy marcado en Europa, puesto que los Cambisoles ocupan más del 20% del territorio, y los Feozem alrededor del 1% solamente (Tóth *et al*, 2008).

Como ejemplo de la degradación de la estructura y las transformaciones que ocurren en los suelos de la llanura costera norte de Nayarit se presentan a continuación (véase tabla 4) los datos de un suelo Feozem tomado bajo arboleda de mango de más de 20 años (véanse figuras 37 y 38) y otro enfrente, clasificado como Cambisol, cultivado en forma permanente por sorgo, frijol y maíz (véase figura 39).



Figura 37.

Perfil de suelo Feozem, conservado bajo arboleda de mango de más de 20 años. Obsérvese la estructura y el color del suelo debido a la humificación como resultado de la estabilidad de la cobertura del suelo por el ciclo biológico de las hojas de los frutales (Llanura Costera Norte de Nayarit, México).

Figura 38.

Estado de la superficie del terreno, del suelo por arboleda de mango de más de 20 años (Llanura costera norte de Nayarit, México).

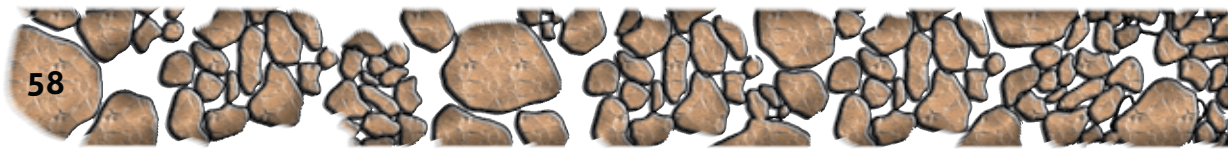


Tabla 4.

Indicadores de la degradación para los diferentes suelos de Nitisol ferrálico lítico éútrico, ródico

Profun. (cm)	MO (%)	C (%)	Densidad aparente (Kg/dm ³)	Reservas de C (mg ha ⁻¹)	Reservas de C (mg ha ⁻¹)			
					0 - 20	0 - 50	0 - 100	50 - 100
0 - 14	4.52	2.62	1.07	39.2	48	85	140	55
14-23	2.16	1.26	1.09	12.4	48	85	140	55
23-35	1.94	1.13	1.13	15.3	48	85	140	55
35-55	1.80	1.04	1.15	23.9				
55-120	1.61	0.93	1.17	70.7	48	85	140	55

Figura 39.

Superficie del suelo Cambisol, cultivado por más de 30 años (estructura en forma de bloques poco porosos), arado para la siembra de sorgo. Situado en un terreno frente a la arboleda de mango.



Tabla 5.

Contenido de materia orgánica, nutrientes y reservas del carbono en el perfil de suelo Feozem.

Profun. (cm)	MO (%)	C (%)	Densidad aparente (Kg/dm ³)	Reservas de C (mg ha ⁻¹)	Reservas de C (mg ha ⁻¹)			
					0 - 20	0 - 50	0 - 100	50 - 100
0 - 22	2,15	1,25	1,35	37.1	34	66	84	16
22 - 30	1,35	0,78	1,61	13.8	34	66	84	16
33 - 49	1,03	0,60	1,57	15.1	34	66	84	16
49 - 100	0,28	0,16	1,62	8.0	34	66	84	16

Al comparar las reservas del suelo clasificado como Cambisol (agrogénico) contra el Feozem bajo plantación de mango (conservado), tenemos que las pérdidas de carbono han sido las siguientes (véase tabla 6). En la llanura costera norte de Nayarit los suelos Feozems transformados en Cambisol, por el manejo se observa mayor pérdida de carbono en la capa de 0 a 100 cm, pues 50 cm a 100 cm el enriquecimiento orgánico es escaso debido a que el cultivo principal en la región es el sorgo, que tiene un sistema radical de poca profundidad.

Tabla 6.

Pérdidas de reservas de carbono en suelos de tipo Feozem y Cambisol en la llanura costera de Nayarit.

Espesor del suelo (cm)	Feozem Reserva de C (mg ha ⁻¹)	Cambisol Reserva de C (Mg ha ⁻¹)	Pérdida (Mg ha ⁻¹)	Pérdida relativa (%)
0 – 20	48	34	14	29,2
0 – 50	85	66	19	22,3
0 – 100	140	84	56	40,0

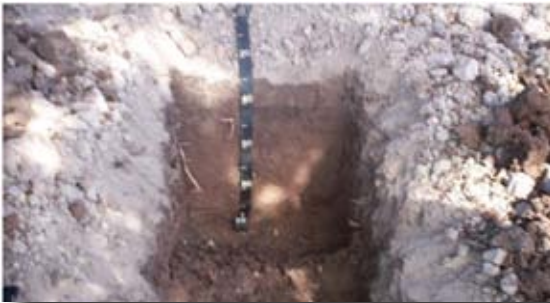
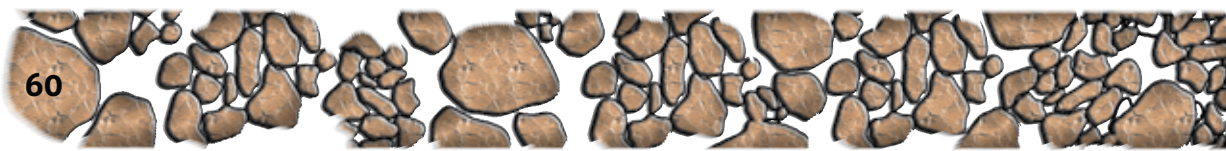


Figura 40.

Estructura degradada por el cultivo continuado en un suelo Feozem, en la Llanura Costera Baja de Nayarit, México (véase figura 40).

En esta región la degradación de la estructura original no se debe solamente a la pérdida de la materia orgánica, sino además al factor climático en la formación del suelo, proceso que Agafonov (1981) denomina formación climatogénica (véase figura 41). Las modificaciones de la estructura originan bloques prismáticos en un proceso denominado eslitización (de la palabra rusa slitii, que significa compacto en estado seco y plástico en estado húmedo).



Degradación del suelo Alisol plíntico, húmico en el área cañera del Central Motzorongo, Veracruz, México

En el área de abastecimiento de caña de azúcar en el Alto Veracruz (Ejido Ojo de Agua en el área cañera del Ingenio Motzorongo) está ocurriendo un problema serio de degradación del suelo por el cultivo de caña. Por 50 años estos suelos han estado sometidos al cultivo de la caña de azúcar, en relieves de 6 % a 12 % de pendiente, con quema y bajo un régimen lluvioso de 1600 a 1800 mm. Los suelos son Alisoles plínticos (húmicos) tienen un horizonte A con muy buena estructura y rico en materia orgánica (en condiciones naturales). El horizonte Bt es rico en aluminio intercambiable y por tanto muy ácido. El cultivo de la caña ha conllevado a procesos erosivos y a la pérdida de gran parte del horizonte A, con el ascenso relativo del horizonte Bt a la superficie, y el consecuente aumento en acidez y aluminio intercambiable en superficie (véanse figuras 43 a 48).

Figuras 41 y 42.

Una subestructura de bloques prismáticos conformada por pequeños agregados de la estructura original del suelo Feozem. En este tipo de estructura está influyendo el factor climático, dando lugar a una estructura de bloques prismáticos, llamado también proceso de eslitización según la edafología rusa.

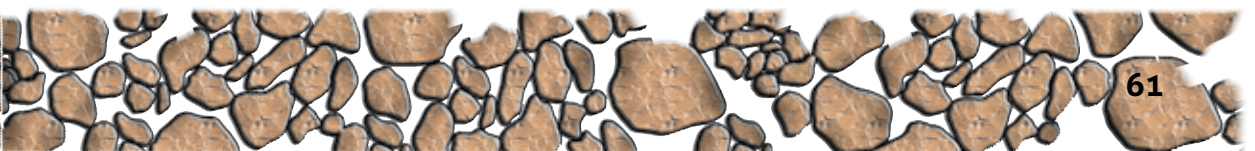


Figura 43.

Perfil de suelo Alisol plíntico, úmbrico (alúmico, húmico, ródico), bajo arboleda permanente, en el ejido Ojo de Agua, del área de abastecimiento en caña de azúcar del Ingenio Motzorongo.



Figura 44.

El mismo suelo pero cultivado, con 10 cm menos de espesor del horizonte A humificado.

Figura 45.

Mismo suelo pero con mayor degradación, debida a la erosión en superficie, en este caso el horizonte A tiene solamente 15 cm. y ha perdido su estructura granular original, formándose una estructura de bloques.

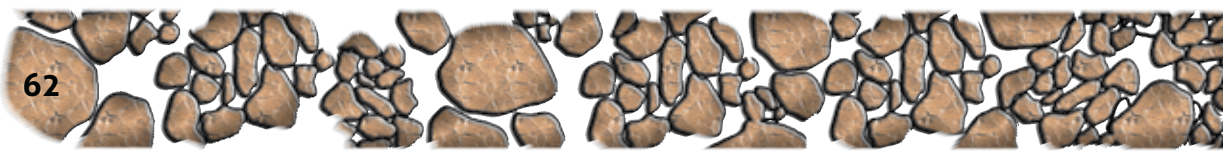




Figura 46.

Mismo suelo pero con mayor degradación. El horizonte A tiene solamente 10 cm.

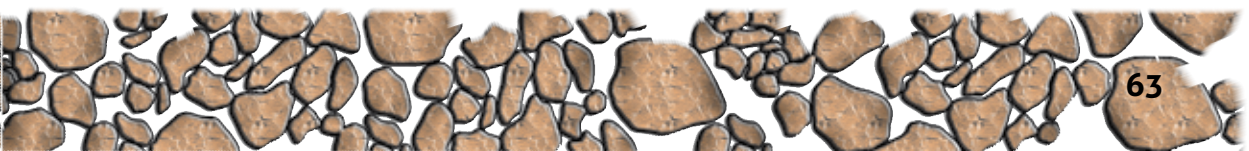
Figura 47.

Ejemplo del arrastre que ocasiona los aguaceros torrenciales en la zona del ejido Ojo de Agua, en el Ingenio Motzorongo.



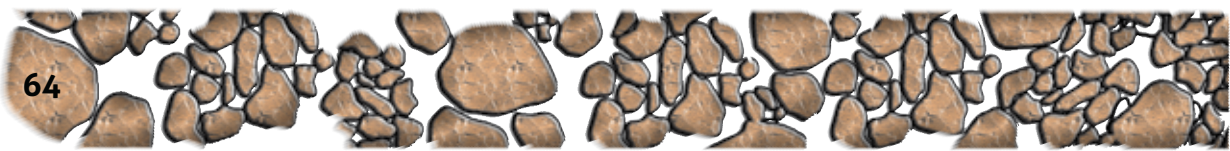
Figura 48.

Arrastre a través de los surcos de caña en un campo con pendiente de 6%, en el ejido Ojo de Agua, Ingenio Motzorongo.



CONSIDERACIONES FINALES

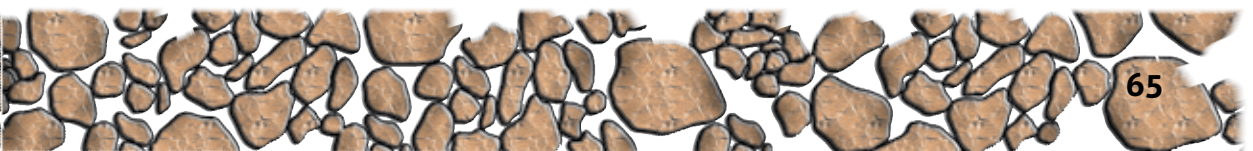
- * Los distintos tipos de estructura que se presentan en los suelos tropicales son nuciforme, granular, terronosa, bloques angulares y bloques subangulares orientados en los tres ejes (x, y, z); prismática, columnar y poliédrica orientados en el eje vertical y laminar y enlosada orientados en el eje horizontal.
- * Existen suelos sin estructura, con grano simple y sin estructura definida masiva.
- * Las estructuras de tipo nuciforme y granular con frecuencia se encuentran en los horizontes superiores de los suelos que tienen alto contenido de materia orgánica y en suelos Feozems (Pardos mullidos y Húmicos Calcimórficos clasificación de suelos de Cuba). También pueden presentarse en los suelos Nitisoles y Ferralsoles (Ferralíticos y Ferríticos), cuando tienen un contenido en materia orgánica mayor de 4%.
- * La estructura terronosa es propia de suelos arenosos mal estructurados. Se puede manifestar también en suelos Arenosoles y en suelos Alisoles (Alíticos) con textura ligera y también en el horizonte A de suelos Ferralíticos cuando están muy cultivados.
- * Los bloques angulares y subangulares se presentan en los horizontes B de suelos Ferralsoles (Ferralíticos), Cambisoles crómicos (Ferrálicos, Fersialíticos) y Cambisoles háplicos (Pardos ócricos). Se pueden encontrar en suelos arcillosos cuando manifiestan cierta intensidad de degradación.
- * La estructura prismática es propia de suelos arcillosos con predominio de las esmeclitas. Es típica de los Vertisoles o de suelos con propiedades vérticas.
- * La estructura poliédrica se presenta típicamente en suelos Ferralíticos Rojos compactados, aunque puede encontrarse en suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados (Nitisoles ferrálicos, ródicos, éutricos, arcillosos).
- * La estructura columnar se puede encontrar en el horizonte Bt de suelos Sódicos o Solonetz.
- * La acción antrópica (cultivo continuo), sobre todo el uso de tecnologías de mecanización, la aplicación de fertilizantes y pesticidas sin aplicar medidas de conservación y mejoramiento de suelos, produce la disminución del contenido de materia orgánica del suelo y la alteración de otras propiedades como es la estructura, den-





sidad aparente, porosidad total y el almacén de agua del suelo.

- * En las transformaciones de la estructura del suelo por influencia del cultivo, llega un momento que influye la acción del clima por encima de la influencia biológica, lo que se conoce entonces como formación climatogénica de la estructura del suelo.
- * Es necesario preparar proyectos al respecto, donde se tengan en cuenta tipo y cantidad de mejorador orgánico, características del suelo y rendimiento de los cultivos.



LITERATURA CITADA

Agafonov, O. A., 1981: Propiedades físicas de los principales tipos de suelos de Cuba, en relación con su génesis y uso agrícola (en ruso). Tesis de Doctor en Ciencias Agrícolas. Instituto de Investigaciones Agroquímicas. VAXHNIL, Leningrado, 290p.

Beare M. H.; Hu aT, S.; Coleman, D.C.; Hendrix, P.F., 2007: Influences of mycelial fungi on soil aggregation and organic matter storage in conventional and no-tillage soils. *Applied Soil Ecology* 5, 211-219.

Bennett, H. H.; Allison, R.V., 1928: Los Suelos de Cuba. Comisión Nacional Cubana de la UNESCO. La Habana, Cuba, 380p, 1962.

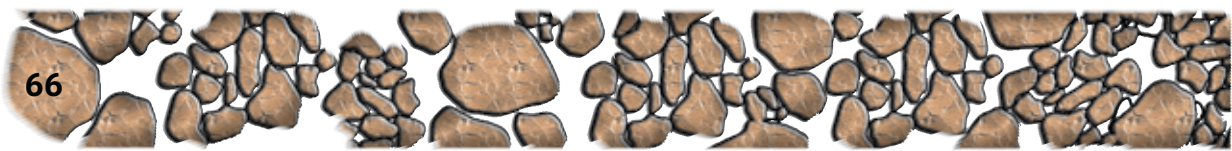
Boix Fayos, C.; Calvo Cases, A.; Imeson, A.C.; Soriano Soto M.D., 2001: Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena* 44. 47-67.


Bojórquez, J. I.; Nájera, O.; Hernández, A.; Flores, F.; González, A.; García, D.; Madueño, A., 2006: Particularidades de formación y principales suelos de la llanura costera norte del estado de Nayarit, México. *Cultivos Tropicales*, La Habana, 27(4):19-26.

Borges, Y., 2003: Cambio de las propiedades de los suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados por la influencia antropogénica, en el ecosistema de la llanura roja de La Habana. Tesis para optar por el título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía, Universidad Agraria de la Habana, 62p.

Cairo, P.; Fundora, O., 1994: Edafología. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, 476p.

Camacho, E., 1982: Estudio de los suelos de la llanura Cársica de la región occidental de Cuba. Estudio de





una zona abierta hacia el mar, situada entre San Nicolás de Bari y Guanajay y particularmente los suelos Ferralíticos Rojos compactados. Autorreferata de Tesis para optar por el Grado de Candidato a Doctor en ciencias Agrícolas. Instituto de Suelos, La Habana, 50p.

Capowiez, Y.; Pierrez, A.; Monestiez, P.; Belzunces, L., 2000: Evolution of burrow systems after the accidental introduction of a new earthworm species into a Swiss pre-alpine pasture. *Biol. Fert. Soil* 31, 494–500.

Cerdá, A., 2000: Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil & Tillage Research* 57. 159-166.

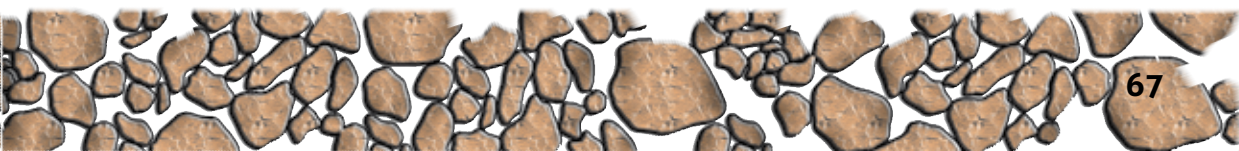
Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy, 2001. Chinese Soil Taxonomy. Institute of Soil Science. Shinese Academy of Sciences. Science Press. Beijing-New York, 203p.

Davidson, Donald; Grieve, I. C., 2006: Relationships between biodiversity and soil structure and function: Evidence from laboratory and field experiments. *Applied Soil Ecology* 33. 176–185.

Delgado, R., 1987: Estado energético del agua y su interrelación con las propiedades físicas e hidrofísicas de los suelos Ferralíticos Rojos de Cuba. Tesis para optar por el Grado Científico de Doctor en Ciencias. Instituto de Suelos, La Habana, Cuba, 131p.

Driver, J. D.; Holben, W. E.; Rillig, M. C., 2005: Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.* 37, 101–106.

Dubrovina, I., 2009: An experience of a large scale soil mapping with the use of a new Russian Soil Classification system. 2009. Abstracts International Conference “Soil Geography: New Horizons”. Huatulco, Oaxaca, Mexico, p 45.



Durodoluwa, J. O.; Schjønning, P.; Sibbesen, E.; Deboz, K., 1999: Aggregation and organic matter fractions of three Nigerian soils as affected by soil disturbance and incorporation of plant material. *Soil & Tillage Research* 50 105-114.

Elberling, B.; Toure, A.; Rasmussen, K., 2003: Changes in soil organic matter following groundnut-millet cropping at three locations in semi-arid Senegal, West Africa. *Agric., Ecosyst. Environ.* 96, 37-47.

Follett, R.F., 2001: Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Tillage Res.* 61, 77- 92.

Fonte, S. J.; Barrios, E.; Six, J., 2010: Earthworms, soil fertility and aggregate associated soil organic matter dynamics in the Quesungual agroforestry system. *Geoderma*. doi:10.1016/j.geoderma.2009.12.016.

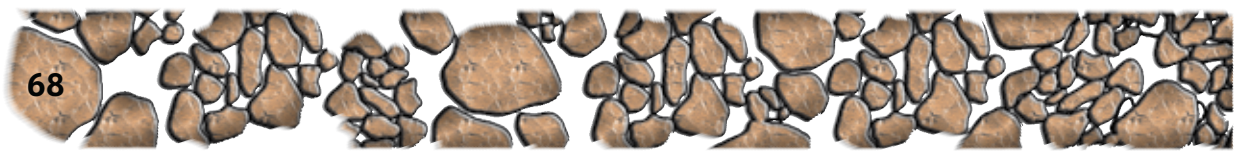
Frey, S. D.; Elliott, E.T ; Paustian K., 1999: Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biol. Biochem.* 31, 573-585.


Giovannetti, M. ; Bendini, S. ;Pellegrino, E. ; Avio, L.;Pellegrini, S.;Bazzoffi, P.;Argese E., 2009: Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 1491-1496.

Green, V. S.; Stott, D. E.; Cruz, J. C.; Curi N., 2007: Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxisol. *Soil & Tillage Research* 92 .114-121.

Green, V. S., Cavigelli, M. A.; Dao, T. H.; . Flanagan D. C., 2005: Soil physical properties and aggregate-associated C, N, and P distributions in organic and conventional cropping systems. *Soil Sci.* 170, 822-831.

Hart, M. M.; Reader, R. J.; Klironomos J. N., 2003: Plant coexistence mediated by arbuscular mycorrhizal fungi. *Trends Ecol. Evol.* 18, 418-423.





Helfrich, M; Ludwig, B.; Buurman, P. ;Flessa H., 2006: Effect of land use on the composition of soil organic matter in density and aggregate fractions as revealed by solid-state ¹³C NMR spectroscopy. *Geoderma* 136. 331–341.

Hernández, A.; Baisre, J.; Tatevasian, G. S. ; Ronda, M., 1980: El hierro total, libre y amorfo en los suelos. *Suelos de Cuba*. Instituto de Suelos, Academia de Ciencias de Cuba, 54 p.

Hernández, A.; Morell, F.; Ascanio, M. O.; Borges Y.; Morales, M.; Yong, A., 2006 b: Cambios globales de los suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados (Nitisoles ródicos éutricos) de la provincia La Habana. *Cultivos Tropicales*, 27(2):41-50.

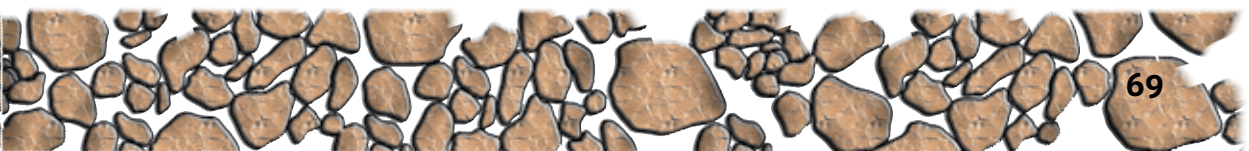
Hernández, A.; Paneque, J.; Pérez, J. M.; Mesa, A.; Bosch, D.; Fuentes E., 1995: Metodología para la cartografía detallada y evaluación integral de los suelos. Insatituto de Suelos y Dirección Nacional de Suelos y Fertilizantes, La Habana, 53p.

Hernández, A.; Pérez, J. M.; Bosch, D. ; Rivero L., 1999: Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba. AGRINFOR, La Habana, 64p.

Hernández, A.; Morales, M.; Morell, F.; Borges, Y.; López D., 2008: Cambios globales en los suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados y Pardos, inducidos por la acción antrópica. Taller de Cambios Globales, CITMA, La Habana.

Hernández, A.; Morales, M.; Morell, F.; Borges, Y.; Bojórquez, J. I.; Ascanio, M. O.; García, J. D.; Ontiveros, H.; Murray. R., 2009: Changes in soil properties by agricultural activity in tropical ecosystems. Abstracts International Conference “Soil Geography: New Horizons”. Huatulco, México. p 57.

Hernández, A.; Ascanio, M. O.; Morales, M.; Bojórquez, J. I.; García N. E.; García J. D., 2006 a: El Suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo. Editorial Universidad de Nayarit, México, 255p.



Hevia, G. G., Méndez, M.; Buschiazzi D. E., 2007: Tillage affects soil aggregation parameters linked with wind erosion. *Geoderma* 140, 90–96.

Hillel, D., 2004: *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Science, Oxford, UK.

Hontoria, C. H.; Velázquez, R.; Benito, M.; Almorox, A.; Moliner, A., 2009: Bradford reactive soil proteins and aggregate stability under abandoned versus tilled olive groves in a semi-arid calcisol. *Soil Biology & Biochemistry* 41 (2009) 1583–1585.

Instituto de Suelos. 2004. Área que ocupan los diferentes Agrupamientos de Suelos de Cuba, según la nueva versión de clasificación de suelos. Datos de archivos.

Jan, D. B., 1969: Enlaces órgano-minerales y estructura del suelo (en ruso). Nauka, Moscú, 141p.

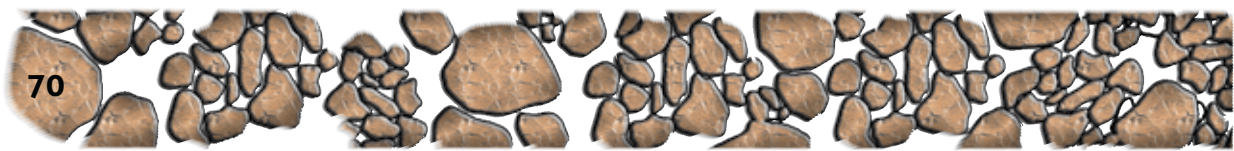
Jarecki, M. K.; Lal, R., 2003: Crop management for soil carbon sequestration. *Crit. Rev. Plant Sci.* 22, 471–502.


Kachinski, N. A., 1975: *Física de Suelos* (en ruso). Editorial Nauka, Moscú, 154p.

Lal, R., 2000: Soil aggregation & C sequestration. In: Lal, R; J.M. Kimble; B. A. Stewart. *Global climate change and tropical ecosystems*. CRC, p: 317-328.

Lal, R.; Follett, R. F.; Kimble, J. M., 2003: Achieving soil carbon sequestration in the United States: a challenge to the policy makers. *Soil Sci.* 168, 827–845.

Linder, M. B.; Szilvay, G. R.; Nakari Setälä, T.; Penttilä M. E., 2005: Hydrophobins: the protein-amphiphiles of filamentous fungi. *FEMS Microbiol. Rev.* 29, 877–896.





Linn, D. M.; Doran J. W., 1984. Aerobic and anaerobic microbial populations in no-till and plowed soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 794–799.

Lupwayi, N. Z.; Arshad, M. A.; Rice, W. A.; Clayton G. W. 2001: Bacterial diversity in water-stable aggregates of soils conventional and zero tillage management. *Applied Soil Ecology* 16. 251–261.

Magid, J.; Gorissen, A.; Giller K. E., 1996: In search of the elusive “active” fraction of soil organic matter: Three size-density fractionation methods for tracing the fate of homogeneously ¹⁴C-labelled plant materials. *Soil Biol. Biochem.* 28, 89-99.

Martens, D. A., 2000: Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biol. Biochem.* 32, 361–369.

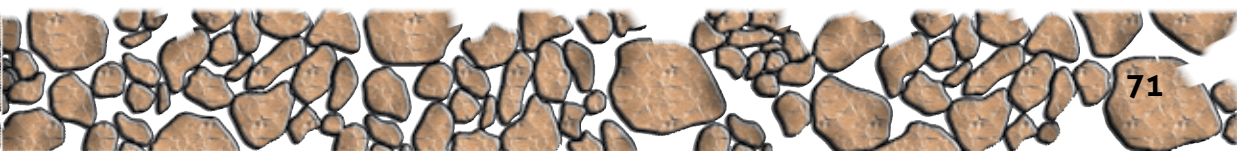
Miller, R. M.; Jastrow, J. D., 2000: Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biol. Biochem.*, 22: 579-584.

Molope, M. B.; Grieve I. C.; Page, E.R., 1987: Contributions of fungi and bacteria to aggregate stability of cultivated soils. *J. Soil Sci.*, 38: 71-77.

Morales, M.; Hernández, A.; Marentes, F.; Funes Monzote, F.; Borges, Y.; Morell, F.; Vargas, D.; Ríos, H., 2008: Nuevos aportes sobre el efecto de la disminución de materia orgánica en los suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados. *Agrotecnia de Cuba*, 32(1):57-64.

Morell, F.; Hernández, A.; Fernández F.; Toledo, Y., 2006: Caracterización agrobiológica de los suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados de la región de San José de las Lajas, en relación con el cambio en el manejo agrícola. *Cultivos Tropicales*, 27(4):13-18.

Nichols, K. A.; Wright, S. F., 2005: Comparison of glomalin and humic acid in eight native U.S. soils. *Soil Sci.* 170, 985–997.



Noellemeyer, E. R. 2008: Carbon content and aggregation related to soil physical and biological properties under a land-use sequence in the semiarid region of Central Argentina. *Soil and Tillage Research* 99,179-190.

Nunan, N.; Wu, K.; Young, I. M.; Crawford, J. W.; Ritz K., 2003: Spatial distribution of bacterial communities and their relationships with the micro-architecture of soil. *FEMS Microbiol. Ecol.* 44, 203–215.

Ontiveros, H., 2008: Influencia del nivel freático y la altitud, en la salinidad de los suelos del sistema de barras de la llanura costera norte de Nayarit. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit, México, 66p.

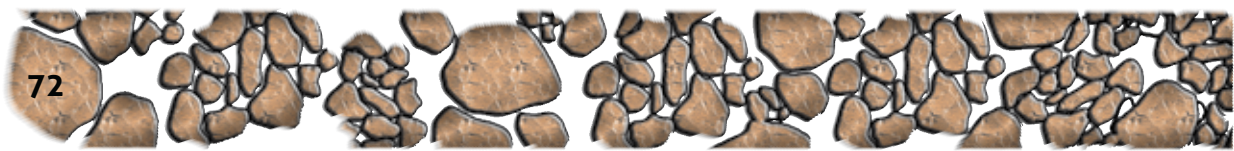
Orellana, R. et al, 1990: Evaluación de métodos de prehumedecimiento para la determinación de la estabilidad estructural de los suelos. *Ciencias de la Agricultura, Cuba* (40): 121-125.

Ortega, F., 1982: La materia orgánica de los suelos y el humus de los suelos de Cuba. Editorial Academia, La Habana, 129p.

Paustian, K.; Six, J. Elliott, E. T.; Hunt, H. W., 2000: Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48:147–163.

Pulleman, M. M.; Six, J.; Uyl, A.; Marinissen, J. C.; Jongmans A. G., 2005: Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. *Applied Soil Ecology* 29, 1–15.

Purin, S.; Matthias, C.; Rillig. M. C., 2007: The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: Limitations, progress, and a new hypothesis for its function. *Pedobiologia* 51. 123-130.





Rantalainen, M. L.; Fritze, H. ;Haimi, J.; Kiikkila, O.; Pennanen, T.; Setala H., 2004: Do enchytraeid worms and habitat corridors facilitate the colonisation of habitat patches by soil microbes. *Biol. Fert. Soils* 39, 200–208.

Read, D.J.; Perez Moreno, J., 2003: Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems—a journey towards relevance? *New Phytol.* 157, 475–492.

Rillig, M. C., 2004. Arbuscular mycorrhizae, glomalin and soil aggregation. *Canadian Journal of soil Science.* 355-363.

Rillig, M. C.; Mummey, D. L., 2006: Mycorrhizas and soil structure. *New Phytol.* 171, 41–53.

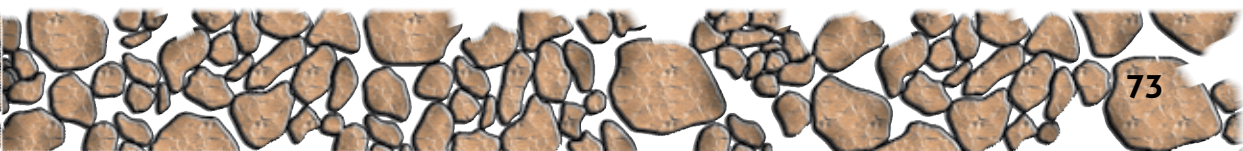
Rillig, M. C.; Purin, S., 2007: The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: Limitations, progress, and a new hypothesis for its function. *Pedobiologia* 51: 123 -130.

Rillig, M. C.; Lutgen, E. R.; Ramsey, P. W.; Klironomos, J. N.; Gannon J. E., 2005: Microbiota accompanying different arbuscular mycorrhizal fungal isolates influence soil aggregation. *Pedobiologia* 49: 251 - 259.

Roberson, E. B.; Sarig, S.; Shennan, C.; Firestone M. K., 1995: Nutritional management of microbial polysaccharides production and aggregation in an agricultural soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 1587-1594.

Roberson, E. B.; Sarig, S.; Firestone, M. K., 1991: Cover crop management of polysaccharide-mediated aggregation in an orchard soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 734-739.

Rosier, C. L. et al, 2008: Intraradical protein and glomalin as a tool for quantifying arbuscular mycorrhizal root colonization. *Pedobiologia* doi:10.1016/j.pedobi.2008.02.002.



Rozanov, B. G., 1983: Morfología de los suelos (en ruso). Universidad Estatal de Moscú, 319p.

Shishov, L. L.; Tonkonogov, V. D.; Levedeva, I. I.; Guerasimova, M. I., 2004: Diagnóstico y Clasificación de Suelos de Rusia (en ruso). Smolensk: Oikumena, 342 p.

Simard, S. W.; Perry, D. A.; Jones, M. D.; Myrold, D. D.; Durall, D. M.; Molina, R., 1997. Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field. *Nature* 388: 579-582.

Six, J.; Elliott, E.; Paustian, K., 2000: Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* 32:2099–2013.

Six, J.; Elliot, E. T.; Paustian, K.; Doran, J. W., 1998: Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 1367–1377.

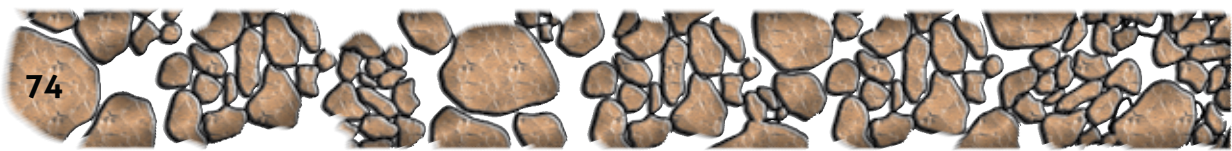
Six, J.; Bossuyt, H.; De Gryze, S.; Deneff, K., 2004: A history of research on the link between microaggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79, 7–31.


Smith, P. 2004: Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *Eur. J. Agron.* 20, 229–236.

Spring, C. A., 2003: The effects of earthworms on soil structure in an upland grassland. Ph.D. Thesis. University of Stirling, unpublished.

Targulian, V. O.; Sokolov, I. A., 1978: Structural and functional approaches to the soil: “Soil memory” and “Soil moment” (in Russian), in mathematical modelling in ecology. Nauka. Moscow, 17-33.

Thompson, L. 1962: El suelo y su fertilidad. Editorial Reverté, S.A., Barcelona, 409p.





Tonkonogov, V.; Guerasimova, M., 2005: Agrogenic pedogenesis and soil evolution. Abstracts International conference Global Soil Change, Mexico City, Mexico, p 79.

Tóth, G., L.; Montanarella, V.; Stolbovoy, F.; Máté, K.; Bodin, A.; Jones, Panagos, P.; Van Liederke, M., 2008: Soils of the European Union. European Commission Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability Land Management and Natural Hazards Unit. Action SOIL. Luxembourg, 85p.

UICS. Grupo de Trabajo de la WRB. 2008: Base de Referencia Mundial del Recurso suelo. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelo. No. 103. FAO. Roma.

Valpassos, M. A. R.; Cavalcante, E. G. S.; Cassiolato, A. M. R.; Alves, M. C., 2001: Effects of soil management systems on soil microbial activity, bulk density and chemical properties. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 36, 1539–1545.

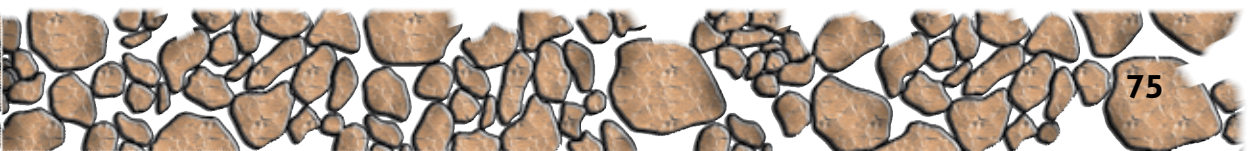
Vershinin, P. V., 1959: Estructura del suelo y condiciones de su formación (en ruso). Editorial Minsk, 173p.

Whalen, J.K.; Hu, Q.; Liu, A. 2003: Manure applications improve aggregate stability in conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 1842– 1847.

Jiao, Y.; Whalen, J. K.; Hendershot, W. H., 2006: No-tillage and manure applications increase aggregation and improve nutrient retention in a sandy-loam soil. *Geoderma* 134: 24– 33.

Wörsten, H. A. B., 2001: Hydrophobins: multipurpose proteins. *Annu. Rev. Microbiol.* 55, 625–646.

Wright, A. L.; Hons, F. M., 2004: Soil Aggregation and Carbon and Nitrogen Storage under Soybean Cropping Sequences. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:507–513.



Wright, S. F.; Jawson, L., 2000: A pressure cooker method to extract glomalin from soils. Soil Science Society of America Journal.

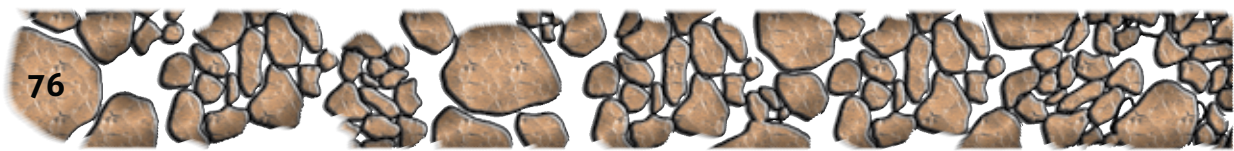
Wright, S. F.; Anderson, R. L., 2000: Aggregate stability and glomalin in alternative crop rotations for the central Great Plains. Biol Fertil Soils 31:249–253.

Wright, S.F.; Green, V. S.; Cavigelli, M. A., 2007: Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. Soil & Tillage Research 94: 546– 549.

Young, I. M.; Crawford, J. W., 2004: Interactions and self-organization in the soil–microbe complex. Science 304: 1634–1637.

Zach, A.; H. Tiessen, E., Noellemeyer. 2006: Carbon turnover and ^{13}C natural abundance under land use change in the semiarid La Pampa, Argentina. Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 70, n° 5: 1541–1546.

Zonn, S. V., 1978: Formación del suelo y suelos tropicales y subtropicales (en ruso). Universidad Patricio Lumumba, Moscú, 438p.

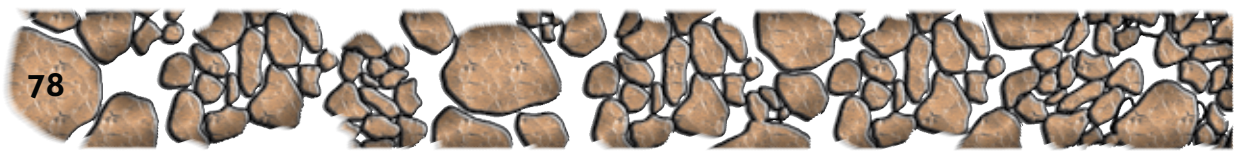




Página intencionalmente en blanco

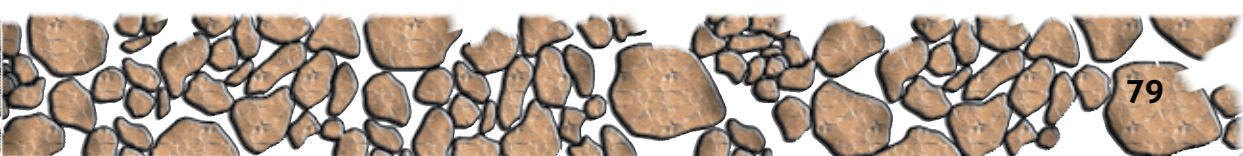
CONTENIDO

Prólogo	7
Introducción	8
Concepto de estructura de suelo	9
Importancia de la estructura del suelo	11
Factores que intervienen en la formación de la estructura del suelo	12
Contenido de arcilla	14
Tipo de arcilla	14
Iones intercambiables	15
Cementantes inorgánicos	15
Compuestos y cementantes orgánicos	16
Aire	17
Temperatura	18
Presión	18
Agua	18
El papel de la materia orgánica en los agregados del suelo	19
La actividad biológica y los agregados del suelo	20
Formación de la estructura de los suelos	25
Proceso de formación de microagregados del suelo	25
Formación de los macroagregados que definen la estructura del suelo	27
Clasificación de la estructura del suelo	29
Clasificación según su forma (morfología)	30
Clasificación por tamaño	32
Clasificación de acuerdo con la fragmentación	32
Métodos de evaluación de la estructura del suelo	32
Método morfológico para evaluar la estructura del suelo	32
Método de la estabilidad estructural	33





Método indirecto del coeficiente de dispersión	35
Tipos de estructura de los principales suelos tropicales	37
Estructura del suelo por formación de agregados orientados en tres ejes (x, y, z)	37
Estructura del suelo por formación de agregados orientados en el eje vertical (y)	41
Estructura del suelo por formación de agregados orientados en el eje horizontal (x)	45
Suelo sin estructura	45
Influencia antropogénica por el cultivo continuo (influencia agrogénica) en la degradación de la estructura del suelo	46
Ejemplos de degradación del suelo y cambio de estructura en ecosistemas tropicales	51
Degradación del suelo Nitisol ferrálico (éutrico, ródico, arcilloso), de la “llanura roja” de La Habana, Cuba	52
Degradación del suelo Feozem y su cambio a Cambisol en la llanura costera norte de Nayarit, México	57
Degradación del suelo Alisol plíntico, húmico en el área cañera del central Motzorongo, Veracruz, México	61
Consideraciones finales	64
Literatura citada	66





ISBN 9786077868279



9 786077 868279 >