

ESTABILIDAD DE ESTRUCTURA EN ANDISOLES DE USO FORESTAL Y CULTIVADOS

Structure Stability in Forested and Cultivated Andisols

Enrique Meza-Pérez¹ y Daniel Geissert-Kientz^{2†}

RESUMEN

La estructura del suelo de los terrenos forestales o de pastizal convertidos a cultivo sufre una significativa modificación. En México, los suelos de origen volcánico de zonas sub-húmedas, deforestados y sometidos a un uso agrícola continuo, padecen a menudo procesos de degradación. El objetivo de este estudio fue determinar la agregación del suelo en Andisoles de uso forestal y cultivados del Cofre de Perote (Veracruz), a fin de establecer la vulnerabilidad de su estructura al impacto de los cambios de uso del suelo. La distribución por tamaño y la estabilidad de agregados en agua se obtuvieron en horizontes en seis Udivitrands, mediante el método de tamizado en húmedo. Los horizontes superficiales forestales presentan una estructura más estable que los cultivados. La pérdida de la estabilidad de los agregados en suelos cultivados se correlacionó con la disminución de la materia orgánica y con el aumento de los microagregados (< 0.25 mm) respecto a los macroagregados (> 2.0 mm); sin embargo, la disminución de la estabilidad estructural después de 50 años de cultivo es sólo moderada. Las principales consecuencias de la degradación de la estructura fueron la pérdida de nitrógeno y la reducción de la retención en agua a capacidad de campo y al punto de marchitez permanente. La distribución por tamaño y la estabilidad de los agregados en agua son parámetros útiles para evaluar la calidad de la estructura en Andisoles forestales convertidos a cultivo.

Palabras clave: estabilidad de agregados en agua, distribución de agregados por tamaño, Vitrand, cambios de uso del suelo.

¹ Laboratorio de Edafología Nicolás Aguilera, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.

² Instituto de Ecología, Apdo. Postal 63, 91000 Xalapa, Veracruz, México.

[†] Autor responsable (geissert@ecologia.edu.mx)

Recibido: septiembre de 2004. Aceptado: diciembre de 2005.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 24: 163-170.

SUMMARY

A significant decline in soil structure occurs on conversion from forest or pasture to conventional cropping, especially after medium- and long-term cropping. In Mexico, continuous cultivation of volcanic ash soils in sub-humid highlands often leads to soil degradation. The objective of this study was to determine soil aggregation in forested and cultivated Andisols in the region of Cofre de Perote (Veracruz), in order to establish how vulnerable its structure is to the impact of land-use changes. Aggregate-size distribution and water-stable aggregates were determined in each horizon of six Udivitrands using the wet-sieving method. Forest topsoil structure appeared to be more stable than cultivated topsoil. Decline in aggregate stability in cropland was correlated with organic matter loss and increases of microaggregates (< 0.25 mm) with respect to macroaggregates (> 2.0 mm). However, the reduction of structural stability after 50 years of cropping is only moderate. The main consequences of structural degradation are the loss of nitrogen and the reduction of water retention at field capacity and permanent wilting point. Aggregate-size distribution and water-stable aggregates were helpful parameters for assessing soil structure quality after conversion of Andisols from forest to cropland.

Index words: water-stable aggregates, aggregate-size distribution, Vitrand, land-use changes.

INTRODUCCIÓN

El agrupamiento natural de las partículas primarias del suelo (arcilla, limo, arena) resulta de procesos físicos que forman los agregados y de procesos químicos y biológicos que los estabilizan (Allison, 1968; Lynch y Bragg, 1985). Esta estabilización se debe esencialmente a la acción cementante de las sustancias inorgánicas y orgánicas. Aun cuando las arcillas, el carbonato de calcio y los sesquióxidos participan en la agregación, el principal agente de unión es la materia orgánica (Koorevaar *et al.*, 1983).

Tisdall y Oades (1982) propusieron un modelo de agregación en el cual los agentes de unión varían según el tamaño de los agregados. En suelos con alto contenido de carbono orgánico (> 2%), los agregados > 2000 µm están unidos por una fina red de raíces e hifas; los de 20 a 250 µm se forman, en gran parte, por partículas de 2 a 20 µm unidas por materia orgánica persistente, óxidos cristalinos y aluminosilicatos amorfos y, finalmente, los de 2 a 20 µm consisten en partículas < 2 µm fuertemente unidas por enlaces orgánicos persistentes y asociadas a células bacterianas.

La estabilidad de los agregados en agua y su distribución por tamaño son indicadores de la susceptibilidad del suelo a la degradación estructural (Boix-Fayos *et al.*, 2001). El uso agrícola a mediano y largo plazo altera la estructura, manifestándose en la disminución de la estabilidad (Shepherd *et al.*, 2001) y del diámetro medio ponderado de los agregados (Dexter, 1988). Ambos parámetros también permiten evaluar el efecto particular de algún sistema de labranza sobre la estructura del suelo (Navarro-Bravo *et al.*, 2000).

Los horizontes superficiales (horizontes A) de los Andisoles forestales tienen comúnmente una estructura granular de desarrollo moderado a fuerte y, a veces, de bloques subangulares (Shoji *et al.*, 1993). En los horizontes cultivados, la estructura tiende a degradarse principalmente por compactación y disminución de la materia orgánica, formando bloques subangulares y angulares. En los horizontes subsuperficiales (horizontes Bw), la estructura es típicamente de bloques subangulares, de mayor tamaño y menor resistencia que en los horizontes superficiales.

La estructura de los Andisoles refleja la abundancia de sustancias no cristalinas (alófano, imogolita, ferrihidrita) y orgánicas. Se caracteriza sobre todo por la gran cantidad de microagregados, en particular resistentes a la dispersión (Shoji *et al.*, 1993). Su desarrollo se relaciona estrechamente con algunas de las propiedades más notorias de estos suelos, como la alta retención de agua (40 a 60% a 33 kPa), la elevada porosidad total (60 a 80%) y el buen drenaje interno. Sin embargo, aunque los Andisoles tengan excelentes propiedades físicas, se tornan frágiles cuando éstas se alteran fuertemente y algunas, como la retención de agua y la porosidad, cambian en forma irreversible (Quantin, 1972; Vidal *et al.*, 1981).

En la región sotavento del Cofre de Perote (Veracruz, México), la intensa deforestación de la primera mitad del siglo XX, el pastoreo nómada y

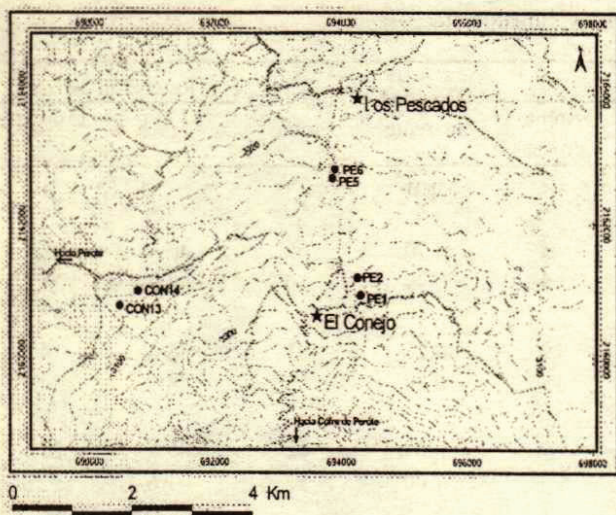
el cultivo de la papa durante las últimas tres décadas, ocasionaron en los Andisoles un incremento de la densidad aparente, una disminución de la porosidad y la pérdida parcial de la materia orgánica y de los nutrimentos (Geissert y Ramírez, 2000). Tales cambios son presuntamente consecuencia de la alteración de la estructura, por lo cual se propone estudiar en suelos forestales y cultivados, la distribución y la estabilidad de los agregados en húmedo, y evaluar los efectos de la inestabilidad estructural ocasionada por el cambio de uso forestal a agrícola, sobre algunas propiedades de los Andisoles de zona sub-húmeda.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se localiza en la ladera noroccidental del volcán Cofre de Perote, entre 3000 y 3300 msnm, perteneciendo a los ejidos de El Conejo (19° 31' N y 97° 10' O) y Los Pescados (19° 32' N y 97° 08' O) del municipio de Perote (Veracruz, México) (Figura 1). El clima es templado semifrío y subhúmedo, con régimen de lluvias de verano. La temperatura media anual oscila de 7 a 9 °C y la precipitación anual, de 900 a 1000 mm (Medina y Angulo, 1990). El régimen de temperatura del suelo es isomésico y el régimen de humedad es ústico (Soil Survey Staff, 1998).

En una zonificación geomorfo-edafológica previa, los suelos de la región se identificaron como Andosoles úmbricos y Andosoles háplicos de clima subhúmedo, desarrollados sobre cenizas de composición andesítica-dacítica de espesor variable, del Pleistoceno superior (Geissert *et al.*, 1994). Dentro del área de estudio, Cruz-Huerta y Geissert-Kientz (2000) establecieron que dichos suelos se caracterizan por un % Al + 1/2Fe (por oxalato de amonio ácido) comprendido entre 2 y 3%, que la relación Al extraíble con pirofosfato/Al extraíble con oxalato ácido varía entre 0.3 y 0.5, y que el contenido de alófano es de 5 a 7%. De acuerdo con la nueva definición de los horizontes ándicos (Poulenard y Herbillon, 2000), los horizontes superficiales de estos suelos pertenecen a la categoría de "sialuándicos", en los cuales los complejos Al-humus llegan a ser los constituyentes secundarios dominantes, asociados, a menudo, a contenidos importantes y variables de alófano.

El muestreo del suelo se realizó en forma aleatoria simple en tres sitios forestales y tres agrícolas, por pares distanciados a menos de 50 m entre sí, en condiciones equivalentes de relieve (laderas con pendiente < 15%) y de suelo (Udivitrand).



Fuente: INEGI (1998).

Figura 1. Mapa de localización.

Los sitios elegidos son representativos de la frontera agrícola de las laderas altas del Cofre de Perote, único lugar donde cultivos y bosques están todavía espacialmente mezclados. El uso forestal es de pino (*Pinus hartwegii*) y abeto (*Abies religiosa*), con pasto natural de *Muhlebergia macroura*, en condiciones mínimas de alteración. El bosque ha sufrido un intenso proceso de fragmentación y se presenta, en la actualidad, en forma de parches y corredores diseminados en el paisaje. El sistema agrícola del área se caracteriza por el cultivo de papa, como monocultivo o en rotación con trigo y haba, durante 50 años. La labranza es tradicional con inversión del suelo a una profundidad de 20 cm, mediante tracción animal. La fertilización es química, pero también se incorporan al suelo los residuos de los cultivos después de la cosecha. Se aplican fungicidas y herbicidas al cultivo de la papa.

Los suelos fueron descritos y muestreados por horizonte y clasificados de acuerdo con la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1998). Los análisis de laboratorio se realizaron sobre muestras simples con dos repeticiones por determinación y se promediaron los valores obtenidos. Las pruebas de Al y Fe extractables en oxalato de amonio ácido, la retención de fósforo y el contenido de vidrio volcánico, utilizados para la determinación de las propiedades ándicas, no se realizaron, ya que se había establecido, con anterioridad, que los suelos son Andisoles (Geissert *et al.*, 1994; Cruz-Huerta y Geissert-Kientz, 2000).

La distribución por tamaño de los agregados estables en agua se determinó en muestras conservadas en

húmedo con el método estándar de tamizado en húmedo de Yoder (1936). Se usaron 500 g de suelo y tamices con malla de 4.76 mm, 2.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm, 0.25 mm y 0.149 mm. La distribución de los agregados por tamaño se expresó con el diámetro medio ponderado (DMP), correspondiente a la suma del porcentaje de suelo que permanece en cada tamiz después del tamizado, multiplicado por el diámetro medio de malla de los tamices adyacentes. La estabilidad de agregados en agua (EAA) se calculó con la fórmula:

$$\text{EAA}(\%) = \frac{\text{Peso (agregado + arena)} \times 100}{\text{Peso inicial-Peso de arena}}$$

La retención de agua se determinó sobre muestras secadas al aire con uso de la olla y membranas de presión, a 33 kPa para la capacidad de campo (CC) y 1500 kPa para el punto de marchitez permanente (PMP).

Los análisis físicos y químicos se realizaron siguiendo la metodología de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). La densidad aparente se determinó por el método del cilindro, la granulometría por el de la pipeta con destrucción de materia orgánica y dispersión con hexametáfosfato de sodio, y los pH en H₂O, en KCl y en NaF por potenciometría en una relación 1:2.5. El calcio, magnesio y aluminio intercambiables se determinaron con un espectrofotómetro de absorción atómica Shimadzu (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japón) y el potasio intercambiable, con un fotómetro de llama Corning (Corning Incorporated, New York, USA).

Los datos se analizaron con el paquete Statistica (StatSoft, 2000). Se realizaron análisis de correlación y análisis de regresión lineal con el método de los "mínimos cuadrados" para establecer la relación entre la estabilidad de agregados en agua y otras variables del suelo. El nivel de confianza es P = 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características Generales de los Suelos

Los pedones PE1 (sitio forestal) y PE2 (sitio agrícola) son *Typic Udivitrands*; los PE5 (forestal), PE6 (agrícola), CON13 (forestal) y CON14 (agrícola) son *Humic Udivitrands*. En general, los suelos son moderadamente profundos (alrededor de 100 cm) con un horizonte superficial (A1 o Ap) de 3 a 30 cm de espesor. Los suelos con bosque presentan, en el horizonte superficial, una estructura granular, de tamaño pequeño

Cuadro 1. Características físicas selectas de los horizontes superficiales y subsuperficiales.

Horizonte	Profundidad cm	Granulometría					Densidad aparente Mg m ³	Porosidad total %	Retención de agua	
		Arcilla	Limo fino	Limo grueso	Arena fina	Arena gruesa			33 kPa	1500 kPa
		----- % -----							----- % -----	
PE1										
A1	0 a 3	14	26	48	9	3	0.70	65	46.4	23.5
A2	3 a 23	16	31	39	9	5	0.90	59	42.0	25.1
PE2										
Ap	0 a 7	10	27	34	18	11	0.20	91	35.3	14.5
A2	7 a 27	12	25	33	15	15	0.30	87	43.1	24.7
PE5										
A1	0 a 23	12	23	46	11	9	0.80	62	49.4	21.7
C	23 a 60	7	13	59	12	9	1.00	52	41.6	22.9
PE6										
Ap	0 a 22	8	14	58	11	10	1.20	48	35.4	14.9
A2	22 a 55	7	16	63	9	6	1.00	52	46.9	23.9
CON13										
A1	0 a 30	10	20	43	19	8	0.60	67	33.9	16.6
A2	30 a 60	9	17	39	22	13	1.20	50	23.5	13.8
CON14										
Ap	0 a 30	9	16	42	21	12	0.80	62	30.6	11.3
A2	30 a 45	9	19	31	25	16	1.30	44	25.3	15.0

a mediano y de desarrollo débil a moderado, en tanto que en el suelo cultivado la estructura no está definida, salvo en el PE6-Ap, donde se observaron bloques subangulares pequeños y de desarrollo débil. En los horizontes subsuperficiales, la estructura es de bloques subangulares de tamaño mediano y desarrollo moderado.

Todos los pedones tenían una textura de tipo migajón-limoso (Cuadro 1), con predominio de los limos gruesos (26% a 63%). Los horizontes superficiales cultivados contenían mayor proporción de arena que los forestales (respectivamente, 28% y 20% en promedio), y menor proporción de arcilla (6.7% y 14.1%, respectivamente). Estos cambios granulométricos relacionados con la cubierta vegetal coinciden con los datos de Martínez-Mena *et al.* (1999) y podrían deberse a un empobrecimiento de las partículas más finas de la matriz del suelo (con un enriquecimiento concomitante de partículas gruesas), producidos por el transporte selectivo de material por erosión hídrica en la época lluviosa o por erosión eólica en la época seca (Wilson y Cooke, 1980). La densidad aparente fue inferior a 0.9 Mg m⁻³ (valor límite superior de propiedad ándica) en los horizontes superficiales, excepto en PE6; en los sitios agrícolas fue más elevada que en los forestales, con

la excepción del PE2. En los horizontes subsuperficiales, los valores fueron mayores que 0.9 Mg m⁻³ (valor límite superior de propiedad ándica) en los horizontes superficiales, excepto en PE6; en los sitios agrícolas fue más elevada que en los forestales, con la excepción del PE2. En los horizontes subsuperficiales los valores fueron mayores que 0.9 Mg m⁻³, pero no así en PE2 donde se mantuvieron bajos. La porosidad total osciló en los horizontes superficiales entre 48 y 91%, siendo más elevada en los horizontes de bosque, salvo en el pedón PE2. La porosidad disminuyó con la profundidad en todos los pedones, excepto en PE6. La retención de agua a 33 kPa varió, en promedio, de 35 a 49%, siendo mayor en los horizontes superficiales de bosque (43.2%) que en los de cultivo (33.8%).

La retención de agua disminuyó con la profundidad en los suelos forestales; esta tendencia no se mostró siempre en los suelos cultivados. La retención de agua a 1500 kPa varió de 11 a 23% y fue más elevada en los horizontes superficiales de bosque (20.6%, en promedio) que en los de cultivo (13.6%). Se presentó un leve aumento de la retención con la profundidad, excepto en el perfil CON13.

Todos los suelos eran moderadamente ácidos (pH = 4.8 a 5.7); los horizontes superficiales fueron más

ácidos que los subsuperficiales (Cuadro 2). El pHNaF fue siempre igual o superior a 10, lo que indica que el suelo contiene grandes cantidades de constituyentes amorfos y/o de complejos Al-humus (Parfitt y Saigusa, 1985). Los valores positivos a ligeramente negativos de la diferencia entre pHKCl y pH_{H₂O} indican la presencia de arcillas alofánicas con carga variable, características de los Andisoles (Nanzoy *et al.*, 1993). El contenido de carbono orgánico (CO) varió entre 0.4 y 8.0%; se encontraron los valores más elevados en los horizontes superficiales (5%, en promedio) en relación con los subsuperficiales (1.6%, en promedio), y más altos en los horizontes forestales (6.7%) que en los cultivados (3.4%). El contenido de nitrógeno total resultó elevado en los horizontes superficiales (0.30%, en promedio), con tendencia a disminuir en el subsuelo. Este nutriente era más abundante en los horizontes superficiales forestales (0.34%, en promedio) y su cantidad disminuyó en los cultivados (0.27%). Los valores de K variaron de alto a bajo, en general más elevados en el subsuelo y en los horizontes superficiales forestales. Las otras bases intercambiables (Ca, Mg) se encontraron en valores bajos. El Al intercambiable presentó valores ≤ 2 cmol_c kg⁻¹, confirmando así el predominio de los minerales amorfos (alófano, imogolita, etc.) sobre los complejos de Al-humus (Quantin, 1994).

Distribución de Agregados por Tamaño

La cantidad de microagregados estables en agua (≤ 0.25 mm) resultó elevada (49%, en promedio) y predominó sobre los meso y macroagregados en todos los horizontes, excepto en PE2-A2 (Cuadro 3). La diferencia de valores entre horizontes superficiales y subsuperficiales no mantuvo un patrón definido, pero hubo una tendencia al aumento de microagregados en los horizontes superficiales cultivados respecto a los forestales. La distribución de los macroagregados estables en agua (> 2.0 mm) estuvo bien definida, tanto en los suelos forestales, como en los cultivados. En los primeros, el porcentaje de macroagregados fue más alto en los horizontes superficiales (22%) que en los subsuperficiales (16%); en los segundos, fue más bajo en los superficiales (13%) que en los subsuperficiales (21%). La disminución de los macroagregados en los horizontes cultivados fue equivalente al aumento de los microagregados, por lo que se concluye que, al cultivar la tierra, los macroagregados son casi integralmente reducidos a microagregados. Nuevamente, PE5 y PE6 constituyeron la excepción, porque el horizonte cultivado de PE6 es parte de un horizonte A2 presentando una estructura de bloques subangulares con mayor cantidad de macroagregados. Debido a que la cantidad de

Cuadro 2. Características químicas selectas de los horizontes superficiales y subsuperficiales.

Horizonte	Profundidad cm	pH			Carbono orgánico %	Nitrógeno total %	Cationes intercambiables cmol _c kg ⁻¹			
		H ₂ O	KCl	NaF			K	Ca	Mg	Al
PE1										
A1	0 a 3	5.3	4.9	10.7	7.3	0.36	0.85	6.10	1.47	1.30
A2	3 a 23	5.3	4.9	10.1	0.4	0.04	1.50	5.73	1.62	1.70
PE2										
Ap	0 a 7	4.8	5.1	10.8	2.4	0.30	0.14	3.60	0.20	0.85
A2	7 a 27	5.1	5.2	10.8	1.5	0.13	0.45	4.00	0.30	0.60
PE5										
A1	0 a 23	4.9	4.8	10.6	8	0.36	0.40	4.67	0.96	2.10
C	23 a 60	5.2	5.7	10.9	2.3	0.17	0.03	3.59	0.53	0.47
PE6										
Ap	0 a 22	4.5	4.6	10.6	5.1	0.32	0.21	3.26	0.07	1.34
A2	22 a 55	4.8	5	11.2	6.6	0.42	0.14	3.70	0.04	1.50
CON13										
A1	0 a 30	5.5	5.4	10.2	4.9	0.29	0.32	5.97	0.35	0.60
A2	30 a 60	5.6	5.8	10.7	1.4	0.12	0.58	4.33	0.20	0.48
CON14										
Ap	0 a 30	5.4	5.3	10.2	2.6	0.20	0.50	6.30	0.15	0.34
A2	30 a 45	5.4	5.4	10.4	1.7	0.16	1.07	6.06	0.47	0.34

Cuadro 3. Distribución y estabilidad de agregados en agua de los horizontes superficiales y subsuperficiales.

Horizonte	Profundidad	Macroagregados	Mesoagregados	Microagregados	Ma/Mi	DMP	EAA
		> 2.00 mm	0.25 a 2.00 mm	< 0.25 mm			
	cm	----- % -----				mm	%
PE1							
A1	0 a 3	25	29	46	0.54	1.34	79
A2	3 a 23	14	34	52	0.27	0.90	80
PE2							
Ap	0 a 7	11	28	56	0.20	0.97	63
A2	7 a 27	28	39	33	0.85	1.55	68
PE5							
A1	0 a 23	16	39	53	0.30	0.98	87
C	23 a 60	14	35	52	0.27	0.91	61
PE6							
Ap	0 a 22	19	27	53	0.36	1.07	74
A2	22 a 55	28	35	36	0.78	1.53	78
CON13							
A1	0 a 30	25	33	42	0.59	1.32	75
A2	30 a 60	19	34	47	0.40	1.12	45
CON14							
Ap	0 a 30	9	32	58	0.15	0.66	49
A2	30 a 45	8	36	56	0.14	0.73	51

microagregados nunca disminuyó en los horizontes superficiales cultivados, incluido PE6, se considera que son más estables que los macroagregados.

El diámetro medio ponderado (DMP) fue, en promedio, de 1.09 mm. En los suelos forestales, más elevado en los horizontes superficiales (1.21 mm) que en los subsuperficiales (0.98 mm), pero en los horizontes cultivados ocurrió lo contrario, excepto en CON14 donde los valores fueron equivalentes. Asimismo, el DMP de los horizontes superficiales forestales (1.21 mm) resultó mayor que en los cultivados (0.90 mm). Debido a que DMP aumentó con la cantidad de macroagregados estables > 2 mm y con la relación macroagregados/microagregados (Ma/Mi), se deduce que el DMP más elevado de los horizontes superficiales forestales no sólo se debió a un mayor número de macroagregados, sino también a una proporción más alta de éstos respecto a los microagregados (Ma/Mi = 0.48 en bosque y 0.24 en cultivo).

Estabilidad de Agregados en Agua

La estabilidad de los agregados en agua (EAA) de todos los suelos y horizontes alcanzó, en promedio, 67%, pero existió una variabilidad importante (Cuadro 3). Las diferencias se manifestaron sobre todo entre

los horizontes superficiales de los suelos forestales y cultivados. Los primeros alcanzaron, en promedio, un valor de 80% y, los segundos, de 62%. La pérdida de estabilidad debido al uso agrícola se situó, en promedio, en 18%, pero pudo alcanzar hasta 26% (entre CON13 y CON14).

De todas las correlaciones obtenidas, el contenido de CO es el que más influyó en la estabilidad de los agregados en los horizontes superficiales ($EAA = 5.2154 (CO) + 44.83$, $r^2 = 0.82$, $n = 6$). La materia orgánica constituye un fuerte agente de unión entre las partículas minerales del suelo y asegura su estabilidad estructural (Tisdall y Oades, 1982), en especial en suelos alofánicos (Churchman y Tate, 1987); tiene también un efecto hidrofóbico en la superficie de las partículas minerales, disminuyendo la velocidad de humectación de los agregados y reduciendo el riesgo de colapso (Jouany *et al.*, 1992). Esta correlación no se encontró en los horizontes subsuperficiales, cuyo comportamiento es distinto al de los superficiales. Otras de las variables estudiadas que, en general, influyen en la estabilidad de la estructura en forma individual o en combinación (cantidad de arcillas, calcio intercambiable y pH), no se correlacionaron con EAA. Esto confirma que la estabilidad de agregados en Andisoles depende, en gran medida, de los fuertes enlaces del CO con las formas

amorfos de Al y Fe (alófano, imogolita, ferrihidrita), mismos que fomentan el desarrollo de una microestructura resistente (Shepherd *et al.*, 2001).

De acuerdo con la clasificación de la inestabilidad de agregados de Le Bissonnais y Le Souder (1995), basada en los valores de DMP (intervalo de 0.025 a 4.0 mm), los horizontes PE1-A1 y CON13-A1 son estables (DMP entre 1.3 y 2.0 mm), los PE2-Ap, PE5-A1 y PE6-Ap moderadamente estables (DMP entre 0.8 y 1.3 mm), y el CON14-Ap inestable (DMP entre 0.4 y 0.8 mm). El DMP presentó una correlación con la EAA sólo en los horizontes superficiales ($r = 0.68$, $P \leq 0.05$; $n = 6$). Con base en esta relación y en la propuesta de Le Bissonnais y Le Souder (1995) sobre la estabilidad de agregados, los Andisoles estudiados se clasificaron en: muy estables (EAA > 80%), estables (EAA de 65 a 80%), moderadamente estables (EAA de 50 a 65%) e inestables (EAA < 50%). Los horizontes con contenido de CO inferior a 1% resultaron altamente susceptibles a la inestabilidad estructural.

Efectos de la Inestabilidad Estructural

Los cambios de estabilidad de la estructura tuvieron consecuencias directas sobre algunas propiedades edáficas importantes, por ejemplo el nitrógeno total (Nt). En los horizontes superficiales, la disminución de la EAA, provocada por la destrucción de los macroagregados durante la labranza, favorece la descomposición acelerada de la materia orgánica particulada (fragmentos de raíces parcialmente descompuestos) contenida en ellos y, en consecuencia, la pérdida del nitrógeno fácilmente mineralizable (Elliott, 1986; Cambardella y Elliott, 1993) (Figura 2).

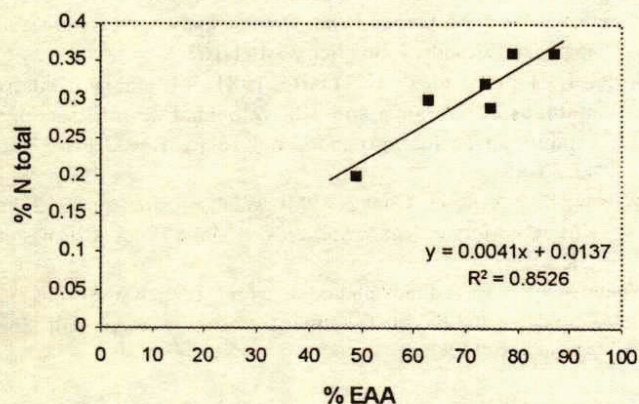


Figura 2. Variación del contenido de Nt en función de EAA en el horizonte superficial.

Sin embargo y debido a que el contenido de Nt permaneció elevado en los terrenos cultivados, se presume que una cantidad importante de N orgánico menos lábil se encuentra estabilizada en los complejos Al-humus y en los microagregados (Shoji *et al.*, 1993). La pérdida de estabilidad de los agregados influyó también en la retención de agua (Figura 3). En los Andisoles, esta retención se debe esencialmente al gran volumen de meso y microporos de los agregados estables, favorecido por los materiales no cristalinos y por la materia orgánica (Shoji *et al.*, 1993). Al perder los agregados su estabilidad, se reducen hasta en 38% el contenido de agua a capacidad de campo (33 kPa) y hasta en 52% al punto de marchitez permanente (1500 kPa), provocando disminución del agua aprovechable. El efecto sobre la retención de agua se observó también en los horizontes subsuperficiales.

CONCLUSIONES

- Los microagregados (< 0.25 mm) dominan en todos los suelos (49%). La proporción de macroagregados (> 2.0 mm) disminuye sensiblemente en los suelos cultivados, mientras que los microagregados aumentan.
- La estabilidad de los agregados es de 80% (muy estable) en los suelos forestales y de 62% (moderadamente estable) en los cultivados. Esta pérdida de estabilidad se debe a la destrucción de los macroagregados y su reducción a microagregados.
- El principal efecto de la pérdida de la estabilidad de los agregados es la disminución de la materia orgánica del suelo, debido a la rápida mineralización de la fracción orgánica contenida en los macroagregados.
- Las consecuencias de la disminución de la materia orgánica son la pérdida del nitrógeno orgánico y

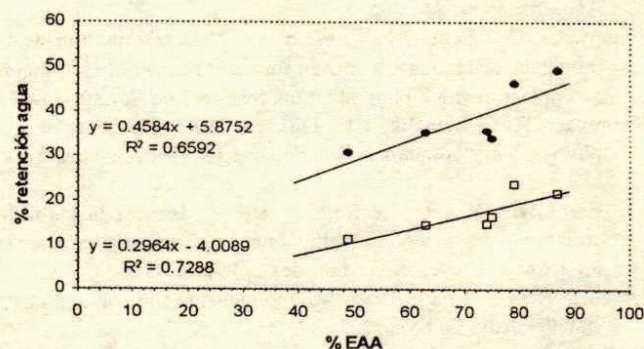


Figura 3. Variación de la retención de agua a 33kPa (●) y a 1500 kPa (□) en función de EAA, en el horizonte superficial.

la reducción del contenido de agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Estela Enríquez Fernández su colaboración en la revisión del manuscrito y a Lourdes Cruz Huerta y Ninfa Portilla Loeza por la realización de los análisis de laboratorio.

LITERATURA CITADA

- Allison, F. E. 1968. Soil aggregation – some facts and fallacies as seen by microbiologist. *Soil Sci.* 106: 136-143.
- Boix-Fayos, C., A. Calvos-Cases, A. C. Imeson y M. D. Soriano-Soto. 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.
- Cambardella, C. A. y E. T. Elliott. 1993. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1071-1076.
- Churchman, G. J. y K. R. Tate. 1987. Stability of aggregates of different size grades in allophanic soils from volcanic ash in New Zealand. *J. Soil Sci.* 38: 19-27.
- Cruz-Huerta, L. y D. Geissert-Kientz. 2000. Carga eléctrica de los Andosoles del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Terra* 18: 115-124.
- Dexter, A. R. 1988. Advances in the characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* 11: 199-238.
- Elliott, E. T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 627-633.
- Geissert, D. y S. M. Ramírez. 2000. Propiedades físicas y químicas de un suelo volcánico bajo bosque y cultivo en Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 2: 31-34.
- Geissert, D., D. Dubroeuq, A. Campos y E. Meza. 1994. Carta de unidades geomorfo-edaforológicas de la región natural Cofre de Perote, Veracruz, México. Escala 1:75000. Instituto de Ecología-ORSTOM-CONACYT. Jalapa, Veracruz, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1998. Datos vectoriales en escala 1:50 000 de la carta topográfica E14B26. Proyección UTM, NAD 1927. Aguascalientes, México.
- Jouany, C., C. Chenu y P. Chassin. 1992. Determination de la mouillabilité des constituants du sol à partir de mesures d'angles de contact: revue bibliographique. *Sciences du Sol* 30: 33-47.
- Koorevaar, P., G. Menelik, y C. Dirksen. 1983. Elements of soil physics. *Developments in Soil Science* 13, Elsevier. New York, NY, USA.
- Le Bissonnais, Y. y C. Le Souder. 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etudes et Gestion des Sols* 2: 43-56.
- Lynch, J. M. y E. Bragg. 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. *Adv. Soil Sci.* 2: 133-171.
- Martínez-Mena, M., J. Álvarez Rogel, J. Albaladejo y V. M. Castillo. 1999. Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semi-arid environment. *Catena* 38:175-190.
- Medina A., M. E. y M. J. Angulo R. 1990. Atlas climático del municipio de Perote. Instituto de Ecología. Xalapa, Veracruz, México.
- Nanzyo, M., R. Dahlgren y S. Shoji. 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. pp.145-187. *In: Shoji, Nanzyo, y Dahlgren. Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science* 21. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Navarro-Bravo A., B. Figueroa-Sandoval, V. M. Ordaz-Chaparro y F. V. González-Cossío. 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. *Terra* 18: 61-69.
- Parfitt, R. L. y M. Saigusa. 1985. Allophane and humus aluminium in Spodosols and Andepts formed from the same volcanic rock beds in New Zealand. *Soil Sci.* 138: 360-364.
- Poulenard, J. y A. J. Herbillon. 2000. Sur l'existence de trois catégories d'horizons de référence dans les andosols. *Sciences de la Terre et des Planètes* 331: 651-657.
- Quantin, P. 1972. Les andosols. *Revue bibliographique des connaissances actuelles. Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 10: 273-301.
- Quantin, P. 1994. The Andosols. pp. 848-859. *In: Transactions 15th World Congress of Soil Science. Vol. 6a. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Acapulco, México.*
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre de 2002. Segunda Sección.
- Shepherd, T. G., S. Saggat, R. H. Newman, C. W. Ross y J. L. Dando. 2001. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils. *Aust. J. Soil Res.* 39: 465-489.
- Shoji, S., M. Nanzyo y R. Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Science* 21. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Soil Survey Staff. 1998. Keys to Soil Taxonomy, 8th Edition. USDA-Natural Resources Conservation Service. Washington DC, USA.
- StatSoft. 2000. Statistica for Windows. Tulsa, OK, USA
- Tisdall, J. M. y J. M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
- Vidal, I., B. Fernández y N. Duarte, 1981. Influencia de cuatro métodos de labranza sobre la velocidad de infiltración y estabilidad de los agregados del suelo. *Rev. Agric. Téc.* 41:83-88.
- Wilson, S. J. y R. U. Cooke. 1980. Wind erosion. pp. 312 *In: Kirkby y Morgan (eds.). Soil erosion. John Wiley. Chichester, UK.*
- Yoder, R. E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.* 28: 337-351.