

ARTICLES ORIGINAUX

OORSPRONKELIJKE ARTIKELS

ORIGINAL ARTICLES

ARTICULOS ORIGINALES

Clasificación y evaluación edafológica de tres sitios experimentales del altiplano central de México

B. Govaerts^{1,3*}, Martha Gabriela Barrera-Franco, A. Limón-Ortega², P. Muñoz-Jiménez, K.D. Sayre³ y J. Deckers¹

Keywords: Edaphological evaluation- Soil classification- Soil limiting factors- Conservation agriculture practices- Mexico

Resumen

La evaluación edafológica y clasificación del suelo constituyen una herramienta indispensable para el entendimiento de los resultados del obtenidos con obre estudios agronómicos y experimentos a largo plazo comparando diferentes sistemas de manejo (labranza cero vs convencional, manejo de residuos, etc.). El objetivo de este artículo es presentar los resultados de la evaluación, análisis y clasificación edafológica de tres sitios, del altiplano central de México. La determinación de los factores edafológicos permite conocer las limitantes antes de difundir las tecnologías de agricultura de conservación desarrolladas por el programa de agronomía del INIFAP en colaboración con el CIMMYT. Los resultados indican que los suelos clasificados, según el sistema de clasificación de la FAO y el sistema taxonómico del USDA, corresponden en Santa Lucía a un Phaeozem cumúlico, o un Cumulic Haplustoll, en El Horno a un Fluvisol mólico, o Mollic Ustifluvents y un Fluvisol háplico, o Typic Ustifluvents, y en Calpulalpan a un Phaeozem petrodúrico, o Entic Duristoll. Los factores limitantes para la producción agrícola en la zona se relacionan principalmente con la disponibilidad de agua, los cambios en estructura y textura a lo largo de los perfiles, el bajo contenido de materia orgánica y el alto riesgo de erosión. Se recomienda la experimentación y extensión agrícola para la implementación de prácticas de agricultura de conservación.

Summary

Edaphological Classification and Evaluation of Three Experimental Sites in the Altiplano Central of Mexico

The edaphological evaluation and soil classification of experimental areas sites are important instruments for the correct interpretation of agronomical results and decision-making about targeting and ex-ante evaluation of agricultural technology transfer. The objective of this article is to present the results of the edaphological evaluation soil, analysis and classification of three sites located in the altiplano central of Mexico. We wanted to determine the limiting factors for agricultural production before recommending conservation practices, as developed by INIFAP in collaboration with CIMMYT. The soils were classified both under the FAO classification system and USDA Soil Taxonomy in Santa Lucía as a cumulic Phaeozem, or a Cumulic Haplustoll, in El Horno as a mollic Fluvisol or Mollic Ustifluvents and a haplic Fluvisol or Typic Ustifluvents, and in Calpulalpan, a petroduric Phaeozem, or Entic Duristoll. The limiting factors for crop production are mainly related to moisture availability, varying structure and texture along the profile, low organic matter content and risk of erosion. Taking into account these limiting factors further development, extension and implementation of conservation agriculture practices is highly recommended.

Introducción

Las prácticas de manejo para la conservación del suelo, como la labranza de conservación (labranza reducida, labranza cero o camas permanentes), la rotación de cultivos y el manejo racional de los residuos de cosecha resultan en una serie de beneficios. Algunos de éstos son reducción de la erosión del suelo (12), retención de mayor humedad, mayor rendimiento, mejor estructura del suelo, mayor disponibilidad de nutrientes y mayor contenido de materia orgánica (1, 2, 3, 6, 14). Cuando se cambia de un sistema de agricultura tradicional hacia uno de agricultura de conservación (4), se debe considerar que hay un periodo de transición en el cual el nuevo sistema logra un equilibrio ecológico a mediano plazo. Por ejemplo con la incorporación retención de residuos de cosecha, se induce un cambio en el ciclo de C y N, el cual influirá en la disponibilidad inmediata de nutrientes (12, 16, 17). El tiempo necesario para llegar a un sistema estable dependerá de las condiciones edafológicas y climáticas. Dada la importancia de las propiedades edafológicas en los procesos agronómicos, es necesario evaluar y clasificar correctamente el suelo para una mejor predicción de la necesidad de implementar las nuevas tecnologías agronómicas y sus posibles impactos. La información obtenida ayudará a una focalización correcta y

una evaluación de impacto *ex ante* para obtener una inversión mas óptima de los recursos disponibles en la extensión de tecnologías.

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de la evaluación, análisis y clasificación edafológica de tres sitios del altiplano central de México (Figura 1). La determinación de los factores edafológicos debe permitir conocer las limitantes antes de difundir las tecnologías de agricultura de conservación desarrolladas por el programa de agronomía del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en colaboración con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

Materiales y métodos

Protocolos

En octubre del 2003 se realizó la evaluación edafológica, la descripción en campo de perfiles, y la determinación de factores limitantes de acuerdo con la metodología propuesta por Siebe *et al.* (15). Se evaluaron tres sitios en el altiplano de México que sirven como puntos focales para la extensión de la tecnología en la region; dos estaciones experimentales

¹Katholieke Universiteit Leuven, Faculty of Bioscience Engineering; Division Soil and Water Management; Celestijnenlaan 200 E, 3001 Leuven, Belgium.

²INIFAP-CEVAMEX, AP10, Km 17.5 Carr. México-Lechería, CP 56230, Chapingo, México.

³CIMMYT, Apdo. Postal 6-641, 06600 México, D.F., México.

* b.govaerts@cgiar.org

Recibido el 03.05.04 y aprobado su publicación el 12.09.06.

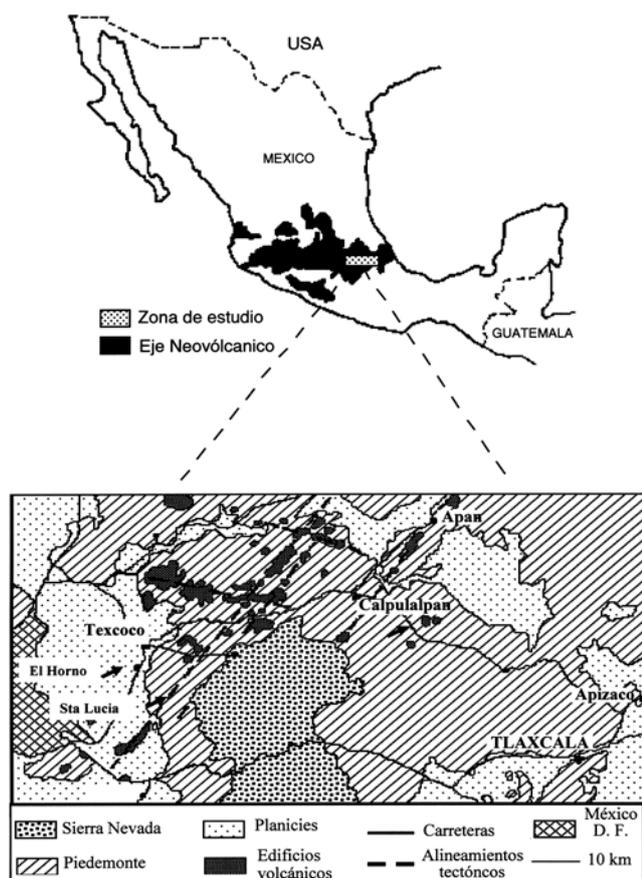


Figura 1: Localización de los campos experimentales INIFAP-CEVAMEX (Peña y Zebrowski, 1993 en Báez Pérez, 2001).

del INIFAP en el valle de México (el Horno y Santa Lucía), y un campo de agricultores en Calpulalpan estado de Tlaxcala donde se realizan actividades de investigación sobre manejo agronómico. Debido a la alta variabilidad vegetativa observada en la estación experimental El Horno, se evaluaron dos perfiles, identificados como perfil I y perfil II. En Santa Lucía y Calpulalpan se evaluó un perfil en cada sitio. Se determinó la localización de los sitios con un GPS. Para los análisis de laboratorio se tomó 1 kg de muestra de cada horizonte. Se determinó el pH (1:2 suelo:agua y 1:2 suelo:0.01 M KCl); el contenido de carbono orgánico (19); la conductividad eléctrica del extracto de saturación; la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (11); la saturación de bases (SB); y la textura por el método del hidrómetro. Se calcularon y determinaron los climatogramas generales con datos diarios de las estaciones climatológicas más cercanas a los sitios sobre un periodo de >20 años (1982-2003 para El Horno y Santa Lucía; 1974-2001 para Calpulalpan). Se calculó el periodo de crecimiento de la planta (PCP) usando la definición de la FAO (7). Los perfiles de suelo y el clima se clasificaron de acuerdo con la clave *World Referente Base* (WRB) (8) y la clave taxonómica de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (18).

Información general de los sitios

Los perfiles de Santa Lucía (2280 msnm, 19° 26'N, 98° 53'O) y El Horno (Perfil I: 2280 msnm, 19° 29'N, 98° 53'O; Perfil II: (2280 msnm, 19° 29'N, 98° 53'O) pertenecen a la misma zona geográfica. Se encuentran en la zona de planicie cercana al antiguo Lago de Texcoco en el Estado de México. La temperatura media y la precipitación anual en ambos sitios es de 15.45 °C y 644 mm respectivamente, la temperatura mínima y máxima promedio es de 5.78 y 24.60 °C respectivamente (datos calculados 1982-2003). Las lluvias se distribuyen irregularmente durante los meses de Mayo a Octubre, periodo en el que se registra aproximadamente un

88% (566 mm) del total; en promedio (>20 years) el mes de julio es el más lluvioso (datos calculados 1982-2003) (Figura 2). La evapotranspiración potencial excede a la precipitación (Figura 2). El PCP en la zona es de 152 días y el clima es clasificado como semi-árido (7). De acuerdo con la clasificación de USDA, el clima se encuentra dentro del régimen *ustic*. Este régimen indica que existe humedad, aunque limitada, durante la época de cultivo. Fisiográficamente, la zona pertenece al Eje Neovolcánico, Subprovincia Lagos y Volcanes del Anáhuac. Se encuentra dentro de la planicie aluvial en la región hidrológica del Alto Pánuco y se ve influenciada por la presencia de corrientes torrenciales que van del este al oeste (13). La vegetación original estaba conformada principalmente por pastizales (13) en la actualidad, todas están convertidas en áreas cultivadas principalmente de maíz (*Zea mays* L.).

En Calpulalpan, Estado de Tlaxcala, México (2500 msnm, 19° 34'N, 98° 32'O), la temperatura media anual es de 13.69 °C y la precipitación total anual de 634 mm (datos calculados 1974-2001). La temperatura mínima y máxima promedio son de 5 y 22 °C, respectivamente. Las lluvias se distribuyen irregularmente, principalmente durante los meses de Junio a Septiembre, en los que se registra el 68% (422 mm) del total de precipitación; agosto es el mes más lluvioso (datos calculados 1974-2001). La evapotranspiración potencial excede a la precipitación (Figura 3). El PCP es de 122 días. El clima en Calpulalpan es semi-árido (7) y está bajo el régimen *ustic* (18). El Estado de Tlaxcala se ubica en su

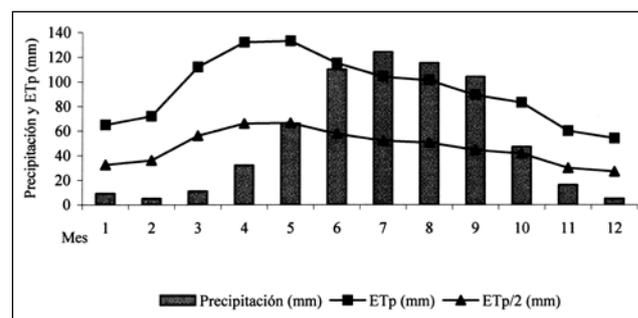


Figura 2: Climograma correspondiente a las estaciones Santa Lucía y El Horno (calculado con datos diarios de clima 1982-2002). PCP=Periodo de Crecimiento de la Planta.

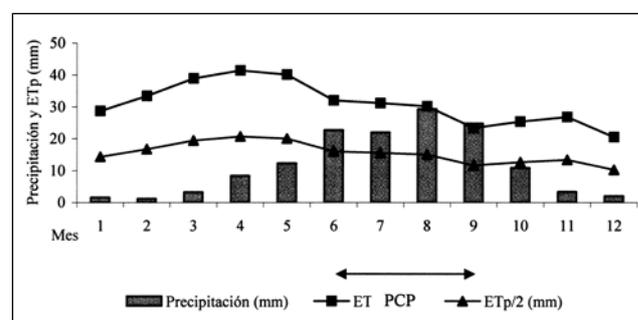


Figura 3: Climograma correspondiente a el campo de agricultores en Calpulalpan (calculado con datos diarios de clima 1974-2001). PCP=Periodo de Crecimiento de la Planta.

totalidad dentro de la zona fisiográfica del Eje Neovolcánico. La zona de estudio forma parte de la región hidrológica del Alto Pánuco. En particular, la zona de glacis de piedemonte de Calpulalpan está constituida por depósitos volcánicos del Cenozoico correspondientes al periodo Terciario, en su mayoría tobas intermedias (13). En Calpulalpan, la vegetación original estaba constituida principalmente por bosques de encino y/o por pastizales, y actualmente existen grandes superficies cultivadas con maíz, trigo (*Triticum aestivum*) y cebada (*Hordeum vulgare*) (13, 20, 21).

Tabla 1
Levantamiento en campo (a) Santa Lucía, (b) El Horno (perfil I), (c) El Horno (perfil II), y (d) Calpulalpan

Profundidad (cm)	Horizonte	Pedregosidad (volumen, %)	Color (húmedo)	pH	Salinidad (dS m ⁻¹)	Estructura		Da (g cm ⁻³)	Poros (abundancia, tamaño, forma, distribución)	Densidad Raíces	Límite
						Forma tamaño grado	Estabilidad				
(a) Santa Lucía											
0-30	Ap	Cantos finos 2%	10 YR 3/2	4.5	0.27	Subangular fina	Moderada	1.21	Comunes, micro, vesiculares, inped	Muy alta	Claro uniforme
30-85	A	Cantos finos <1%	10 YR 3/2	4.5	0.62	Migajón media moderada	Moderada	0.85	Pocos, finos, vesiculares, exped	Alta	Claro uniforme
85-95	2AC	Gravas finas y gruesas >50%	10 YR 3/2	4.5	0.13	Sin agregación	No aplica	1.05	No presenta	No presenta	Claro uniforme
95-142	3Ab ₁	Piedras 15%	10 YR 2/2	5.5	0.16	Subangular fina	Muy baja	1.01	Pocos, finos, vesiculares, exped	No presenta	Claro uniforme
142-180	3Ab ₂	Gravas finas 1%	10 YR 2/1	5.0	0.21	Migajón gruesa débil	Muy baja	1.10	Pocos, finos, vesiculares, exped	No presenta	Claro uniforme
(b) El Horno (perfil I)											
0-10	Ap ₁	1%	10 YR 3/2	5.5	0.23	Fragmentos, fuerte	Muy baja	1.12	Comunes, finos, tubulares, exped	Extrema alta	Claro irregular
10-24	Ap ₂	1%	10 YR 3/2	5.5	0.13	Angular, fina, fuerte. 1 nódulo	Muy baja	1.09	Pocos, muy finos, irregulares, exped	Muy alta	Gradual uniforme
24-50	AC ₁	1%	10 YR 3/3	5.0	0.09	Migajón, media, moderada	Muy baja	1.04	Comunes, micro, vesiculares, inped	Alta	Gradual uniforme
50-61	AC ₂	Redondas, gravas media 7%	10 YR 3/2	5.0	0.20	Migajón, media, débil	Muy baja	1.40	No presenta	Media	Gradual uniforme
61-77	2C ₁	Redondas, piedras angulares 40%	10 YR 4/2	5.0	0.12	Sin agregación	No aplica	1.47	No presenta	No presenta	Gradual ondulado
77-100	2C ₂	Redondas, gravas finas 7%	10 YR 4/3	5.0	0.31	Migajón, media, muy débil	Muy baja	1.52	Pocos, micro, vesiculares, inped	No presenta	Gradual uniforme
100-115	2C ₃	Redondas, gravas finas 20%	10 YR 3/1	5.0	0.21	Migajón, media, muy débil	Muy baja	1.25	No presenta	No presenta	Gradual ondulado
115-153	3Ab ₁	Redondas, gravas finas 1%	10 YR 3/3	5.5	0.22	Angular, fina, moderada	Baja	0.84	Pocos, finos, vesiculares, exped	No presenta	Claro ondulado
153-180	3Ab ₂	Redondas, gravas finas 1%	10 YR 3/1	6.0	0.23	Subangular, fina, moderada	Baja	0.86	Pocos, micro, vesiculares, inped	No presenta	Claro uniforme
(c) El Horno (perfil II)											
0-7	Ap1	Redondas, gravas medias 2%	10 YR 3/2	5.0	0.11	Subangular, fina-media, moderada	Baja	1.47	Pocos, micro, irregulares, inped	Muy alta	Claro ondulado
7-27	Ap2	Redondas, gravas medias 2%	10 YR 3/2	5.5	0.07	Subangular, fina, moderada	Baja	1.34	Pocos, micro, irregulares, inped	Muy alta	Claro ondulado
27-67	2C	Redondas, piedras >50%	10 YR 4/1	5.0	0.04	No agregada	No aplica	1.30	No presenta	No presenta	Claro ondulado
67-130	3Ab ₁	Redondas, gravas medias <1%	10 YR 3/2	5.5	0.14	Subangular, muy fina, débil	Baja	0.90	Comunes, muy finos, vesiculares, exped	No presenta	Claro ondulado
130-180	3Ab ₂	Angulares, cantos medios <1%	10 YR 3/1	5.5	0.19	Subangular, fina, muy débil	Moderada	1.03	Comunes, muy finos, vesiculares, exped	No presenta	Difuso ondulado
(d) Calpulalpan											
0-26	Ap	<1%	10 YR 2/1	6+	0.22	Fragmentos, variable, moderada	1.47	1.37	Pocos, micro, vesiculares, inped	Muy alta	Claro uniforme
26-62	A	<1%	10 YR 2/1	5.0	0.26	Subangular, fina, moderada	Muy baja	1.35	Comunes, micro, vesiculares, exped	Alta	Claro uniforme
62-100	2AC	No aplica	No se midió	4.5	0.06	Cementado	No aplica	No aplica	No aplica	No presenta	Claro uniforme

Tabla 2
Análisis de Laboratorio (a) Santa Lucía, (b) El Horno (perfil I), (c) El Horno (perfil II), y (d) Calpulalpan

Profundidad (cm)	Horizonte	MO (%)	Humedad (%)	Arcilla Limo Arena			N (%)	Ca Mg K Na CIC SB					
				----- (%) -----				----- (meq 100g ⁻¹) -----					
0-30	Ap	1.96	28.37	42.3	28.9	28.8	0.147	12.9	7.0	0.9	0.3	12.1	174
30-85	A	0.58	27.24	27.3	33.9	38.8	0.047	10.4	5.9	0.3	0.5	10.9	156
85-95	2AC	0.52	6.08	9.3	9.4	81.3	No se midió	4.2	2.1	0.1	0.2	9.0	74
95-142	3Ab ₁	1.54	18.35	23.9	32.3	43.8	No se midió	10.8	5.0	0.3	0.5	12.2	136
142-180	3Ab ₂	2.00	22.47	26.0	31.4	42.6	No se midió	13.0	5.0	0.2	0.6	11.2	168
(b) El Horno (perfil I)													
0-10	Ap ₁	1.29	20.12	33.6	22.6	43.8	0.088	9.6	5.2	1.1	0.4	13.1	124
10-24	Ap ₂	1.00	18.79	33.0	23.2	43.8	0.077	9.7	5.1	0.6	0.5	13.1	122
24-50	AC ₁	0.34	18.47	21.2	25.0	53.8	0.027	8.3	4.3	0.4	0.5	13.1	103
50-61	AC ₂	0.36	12.75	29.0	30.9	40.1	No se midió	10.4	5.3	0.3	0.7	13.0	128
61-77	2C ₁	0.08	7.17	7.3	11.3	81.4	No se midió	3.8	1.9	0.2	0.2	7.3	83
77-100	2C ₂	0.20	17.10	15.6	16.9	67.5	No se midió	6.2	3.2	0.3	0.4	10.7	94
100-115	2C ₃	0.08	13.77	6.3	7.3	86.4	No se midió	2.2	1.1	0.1	0.1	5.1	70
115-153	3Ab ₁	0.35	35.42	41.6	48.4	10.0	No se midió	12.7	8.7	1.0	0.9	16.0	146
153-180	3Ab ₂	0.72	42.35	66.7	28.2	5.1	No se midió	14.0	13.7	1.5	1.0	29.9	101
(c) El Horno (perfil II)													
0-7	Ap1	0.89	13.98	25.4	15.8	58.8	0.066	8.0	4.4	0.6	0.2	11.6	114
7-27	Ap2	0.52	14.92	21.7	17.0	61.3	0.037	6.9	3.8	0.3	0.3	10.2	111
27-67	2C	0.07	8.42	5.0	4.7	90.3	No se midió	2.8	1.6	0.2	0.2	6.3	76
67-130	3Ab ₁	0.88	36.33	33.3	31.7	35.0	No se midió	10.3	7.7	0.8	0.8	17.6	111
130-180	3Ab ₂	1.36	23.49	37.7	45.2	17.1	No se midió	13.2	10.7	1.2	0.9	17.5	148
(d) Calpulalpan													
0-26	Ap	1.50	16.33	19.7	21.5	58.8	0.087	5.5	3.5	0.2	0.2	9.4	100
26-62	A	0.91	17.47	22.5	21.2	56.3	0.059	12.9	7.0	0.9	0.3	12.1	174
62-100	2AC						No se midió						

Resultados y Discusión

Levantamiento en campo y análisis de laboratorio

El perfil de Santa Lucía (Figura 4) se dividió en cinco estratos de acuerdo a la acumulación estratificada de material con partículas de diferentes tamaños y variaciones en el contenido de materia orgánica (Tablas 1 y 2). Se puede distinguir una capa arable hasta los 30 cm de profundidad (Ap), la cual presenta una densidad aparente mayor en relación con el resto de los horizontes. Se encontraron raíces hasta los 50 cm, aunque la profundidad potencial de las mismas es de 85 cm. La baja porosidad en la parte superior del perfil puede ser el resultado de la intensa actividad agrícola que consiste en la siembra anual de cultivos, principalmente trigo y maíz, bajo sistemas de labranza convencional (arado a 30 cm seguido por dos, o hasta a tres rastreos). El segundo horizonte se clasificó como A al no estar influenciado por el arado y de acuerdo con el contenido de materia orgánica (0.58%). El tercer horizonte presenta una cantidad importante de piedras (> 50%), carece de estructura (hay un cambio importante en la textura y acumulación de materia orgánica), la humedad disminuye drásticamente (de pF 3.5 a 5), y fue clasificado como un estrato de transición hacia una capa mineral no consolidada (2AC). Los dos horizontes restantes se consideraron 3Ab₁ y 3Ab₂, respectivamente, variando entre ellos el contenido de piedras. Esta asignación se debe al incremento en el contenido de materia orgánica (Tabla 2) y la presencia de una estructura en comparación con los estratos superiores (Tabla 2), lo que podría indicar que son horizontes que han sido invertidos por la actividad agrícola.

El perfil I en el campo en El Horno (Figura 5) tiene una acumulación estratificada de material con diferentes

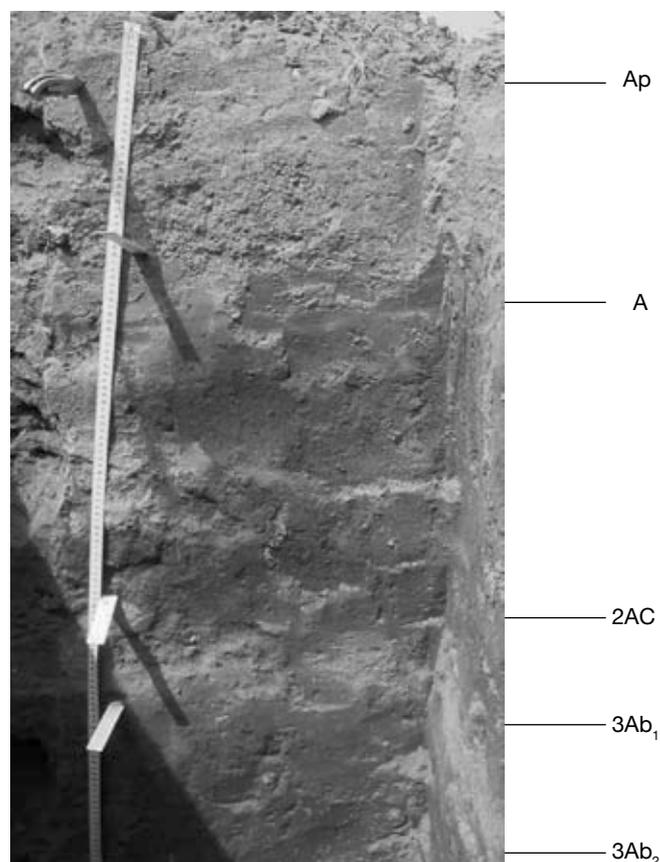


Figura 4: Perfil bajo estudio en Santa Lucía.

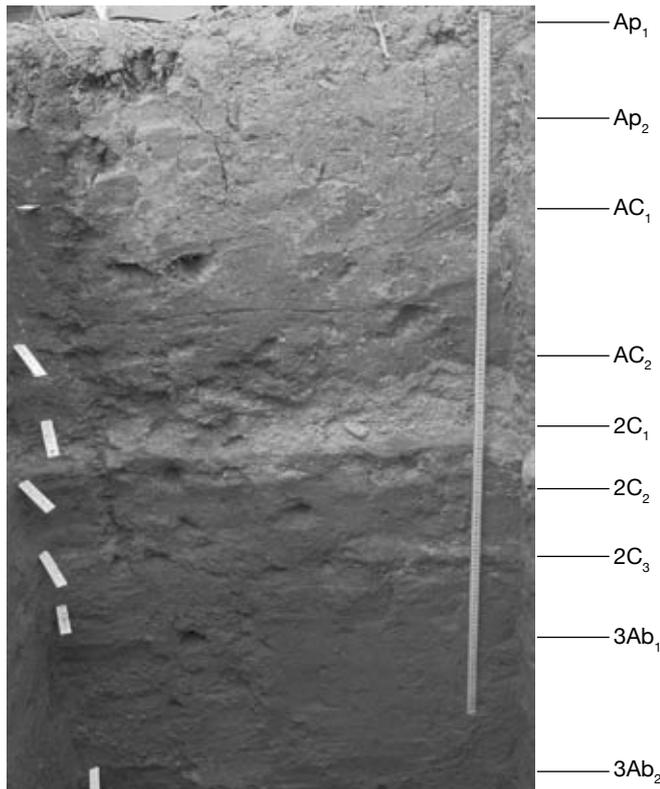


Figura 5: Perfil I en El Horno.

tamaños de partículas, se dividió en nueve estratos. Se distinguen dos capas arables, la primera hasta los 10 cm de profundidad (Ap₁) y la segunda, hasta los 24 cm (Ap₂) (Tabla 1). El tercero y cuarto horizonte se clasificaron como estratos de transición hacia capas minerales no consolidadas (AC₁ y AC₂), estos tienen diferente contenido de piedras, textura y densidad de raíces (Tablas 1 y 2). Las raíces se encuentran sólo hasta los 60 cm, debido a la gran cantidad de piedras encontradas a partir del cuarto horizonte. La pedregosidad, textura y estructura del quinto, sexto y séptimo horizonte son diferentes y fueron asignados como 2C₁, 2C₂ y 2C₃ (Tablas 1 y 2). Finalmente, los últimos dos estratos se denominaron 3Ab₁ y 3Ab₂ ya que la presencia de estructura, el cambio de textura y el incremento en el contenido de materia orgánica sugieren que se trata de horizontes invertidos (Tablas 1 y 2). La estabilidad de agregados a lo largo del perfil (incluso el quinto horizonte carece de estructura) es muy baja y se relaciona con las variaciones en la cantidad de arena encontrada en cada uno de los horizontes.

En el perfil II en El Horno (Figura 6), existe una acumulación estratificada de material con partículas de distintos tamaños. Se distinguen dos capas arables: la primera hasta los 7 cm (Ap₁) y la segunda hasta los 27 cm (Ap₂). Nuevamente, la presencia de raíces se ve limitada por un horizonte con alta pedregosidad. El tercer horizonte 2C se distingue del cuarto y quinto estrato (3Ab₁ y 3Ab₂, respectivamente) por su origen. Esto ha dado como resultado un nivel diferente entre estratos de pedregosidad, estructura y textura (Tablas 1 y 2). En general también se presenta una baja estabilidad de agregados, los cuales tienden en su mayoría a formar una estructura subangular, con excepción del tercer horizonte, que no está estructurado (Tablas 1 y 2).

El perfil en Calpulalpan (Figura 7) se dividió en tres diferentes estratos: una capa arable que llega hasta los 26 cm (Ap) con una estructura disturbada, un horizonte A con estructura subangular y un estrato 2AC. Estas diferencias se deben al cambio drástico en textura y acumulación

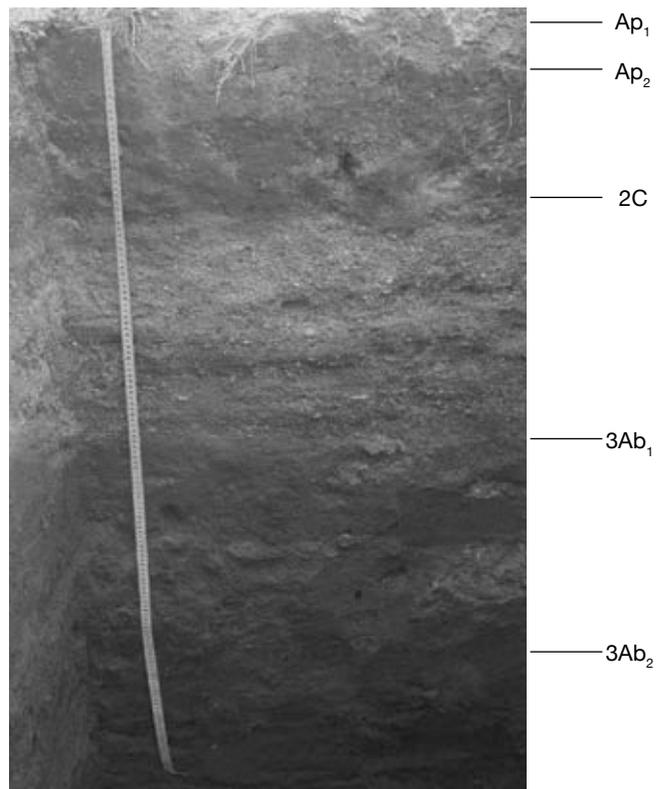


Figura 6: Perfil II en El Horno.

de material orgánico entre estratos. Este último horizonte presenta las características correspondientes a un tepetate de color pardo y lamelas que reaccionan al CaCO₃ (pH 5.5, conductividad eléctrica de 0.1 dS m⁻¹); el resto del horizonte 2AC no presenta esta reacción (pH 4, conductividad eléctrica de 0.06 dS m⁻¹). El comienzo de este estrato marca el límite de crecimiento de las raíces. Los primeros dos horizontes tienen una muy baja estabilidad de agregados.

Clasificación del suelo

En la estación de Santa Lucía se asignó, bajo el sistema WRB (8) y USDA (18), un horizonte de diagnóstico o epipedon mólico (*L. mollis*, suave). Es un horizonte bien estructurado (generalmente granular o subangular, en bloques), de color oscuro, con alta saturación de bases (> 50%) y un contenido moderado de materia orgánica (> 1%) (8). Para indicar la acumulación de material se clasificó el suelo en el WRB como *Phaeozem cumúllico*. En el sistema USDA el orden de suelo corresponde a un *Mollisol*. Debido a que el clima del área se clasifica como ústico y el suelo no presenta ningún atributo en particular, se asignó un suborden de *Ustolls* con el gran grupo *Haplustoll* y un subgrupo *Cumúlico*. Los suelos *Cumúlicos* se forman a partir de sedimentos fluviales donde hay una deposición importante de materia orgánica, resultado de eventos de inundación. El cambio drástico en el tamaño de las partículas y las fluctuaciones en el contenido de carbono orgánico son característicos de ambientes fluviales. A nivel de familia y según la distribución de partículas, la mineralogía y la clase de temperatura del suelo, el perfil en Santa Lucía se clasificó como un *fine-loamy mixed thermic Cumúlico Haplustoll*.

De acuerdo con el WRB, el perfil I de El Horno corresponde a un *Fluvisol mólico*, y el perfil II a un *Fluvisol háptico*. En el USDA el orden de suelo de los perfiles corresponde a un *Entisol*. Se les asignó el suborden *Fluvents* y el gran grupo *Ustifluent* debido a que: el suelo no presenta contacto *densic*, *lithic* ni *paralithic* dentro de los primeros 25 cm; el

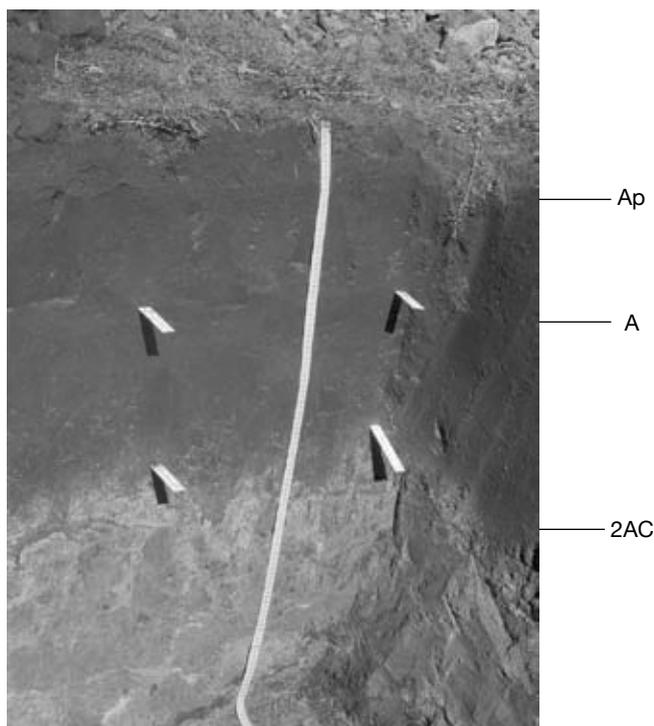


Figura 7: Perfil bajo estudio en Calpulalpan.

contenido de materia orgánica decrece de manera irregular; y el régimen de humedad se identificó como *ustic*. Además, se asignó el perfil I al subgrupo *Mollic* debido a la gran cantidad de materia orgánica en el estrato superficial del suelo. A nivel de familia y de acuerdo con la distribución de partículas, la mineralogía y la clase de temperatura del suelo, el perfil I en El Horno corresponde a un *fine-loamy over sandy mixed thermic Mollic Ustifluvents*. El perfil II se clasifica como *loamy over sandy mixed thermic Typic Ustifluvents*. Los *Fluvisoles* son suelos poco desarrollados a partir de depósitos aluviales, ya sea fluviales, lacustres o marinos (*L. fluvius*, río).

Se encuentran horizontes AC con evidente estratificación, aunque la diferenciación entre estratos no siempre suele ser muy marcada. Son suelos bien aireados (de color café) o suelos (de color grisáceo) en los que existe cierto estancamiento de agua (9). En general, sus propiedades químicas pueden ser influenciadas por condiciones de oxidación y, en algunos casos, por salinidad. La mayoría de los *Fluvisoles* llega a presentar cierta humedad en alguna parte del perfil debido al estancamiento de agua, ya sea del manto freático o por inundación a partir de ríos o lagos, aunque esto depende de su ubicación dentro de la parte activa de la planicie aluvial (5).

El perfil en Calpulalpan corresponde a un *Phaeozem petrodúrico* (*L. durus*, duro) en el WRB. Estos suelos presentan, de manera secundaria, una capa endurecida en los primeros 100 cm (horizonte *petrodúrico*, con un espesor que va de los 10 cm a los 4 m). Se desarrollan a partir de materiales parentales aluviales y coluviales de todas las clases texturales. Tienen horizontes AC o ABC, y es común que estén erosionados en terrenos de pendiente moderada con horizontes petrodúricos expuestos. La capacidad de agua disponible depende del espesor y composición del suelo sobre el horizonte *petrodúrico*, el cual obstruye el movimiento vertical del agua (5). En este caso, el estrato sobre el horizonte *petrodúrico* está bien estructurado y es de color oscuro, con una SB alta y un contenido moderado

de materia orgánica. En el USDA se asignó un epipedón mólico por lo que el orden edafológico corresponde a un *Mollisol*. Como el clima del área se clasifica como *ustic* y el suelo no presenta ningún atributo en particular, se le asignó el suborden de *Ustolls* y gran grupo *Duristoll* debido a la presencia de un duripan. Al no contar con un horizonte *argillic* el subgrupo asignado es *entic*. Considerando el nivel de familia, el suelo se clasificó como *fine-loamy mixed thermic Entic Duristoll*.

Evaluación del perfil y análisis edafológico

En base a las características de los perfiles y las observaciones de campo aplicando la metodología formal de Siebe *et al.* (15), se derivan los factores limitantes de la zona agro-ecológica. En Santa Lucía los factores que limitan el desarrollo de los cultivos se relacionan con una baja disponibilidad de agua en los primeros horizontes (principalmente en la época de sequía), los cambios en el tamaño de partículas, en la conductividad hidráulica correspondiente (en particular la presencia en el tercer horizonte de una gran cantidad de piedras), y la baja capacidad de aireación del primer horizonte (Tabla 3). Es importante mencionar que este suelo presenta un factor de erodabilidad medio bajo el sistema de clasificación de Siebe *et al.* (15). Los factores limitantes en perfil I de El Horno son la baja disponibilidad de agua en los primeros horizontes y la baja capacidad de aireación, a pesar de contar con un espacio poroso que va de medio a alto (Tabla 3). En general, se presenta una alta conductividad hidráulica, lo cual puede propiciar falta de retención de agua. Además, el bajo contenido de materia orgánica pudiera también afectar el rendimiento de los cultivos. En el área del perfil II se observaron variaciones en el crecimiento de las plantas. La variabilidad del cultivo proporciona información indirecta sobre la variabilidad del suelo. Esta variabilidad es un parámetro sub-evaluado en la evaluación edafológica integrada. La variabilidad observada tiene un ritmo regular y ondular. Se relacionan con las diferencias en el contenido de piedras y la textura, en particular la cantidad de arena de los perfiles. En este sentido, tanto las variaciones en el crecimiento de las plantas como las diferencias en textura y piedras encontradas en el área, reflejan la variabilidad espacial existente. Lugares con alto contenido de piedras y arena muy a la superficie en el perfil correspondían con plantas bajas en crecimiento. Esta variabilidad puede ser causada por la actividad de un río cercano y la deposición de material del río. La caracterización de esta variabilidad dentro de toda la estación experimental de El Horno, permitiría identificar y delimitar áreas de menor variabilidad para el posicionamiento correcto de las parcelas experimentales. Estos suelos presentan factores de erodabilidad de medio a alto.

Los factores limitantes en Calpulalpan son la baja disponibilidad de agua en los primeros horizontes (especialmente durante la época de sequía) y la baja capacidad relativa de aireación de los estratos por encima del horizonte petrodúrico (posiblemente relacionada con la actividad agrícola presente). Los horizontes Ap y A sólo tienen un espesor de 62 cm con un factor de erodabilidad medio. La pérdida de suelo podría ser crítica en el primer horizonte con una estructura fragmentada muy débil (Tabla 1). Otra característica importante es la presencia de un estrato compactado de tepetate. Estos son horizontes endurecidos originados a partir del depósito de materiales volcánicos que fueron proyectados en forma de lluvias o flujos, y son comunes en regiones que tienen una temporada de sequía bien marcada. El endurecimiento pudo deberse a procesos geológicos o pedológicos, éste último mediante el aporte de agentes cementantes como carbonato de calcio, sílice y/u óxidos de hierro (21). Los tepetates ocupan alrededor del 11.63% del territorio de México (9), pero en el Estado de

Tabla 3
Evaluación edafológica en (a) Santa Lucía (b) El Horno (perfil I), (c) El Horno (perfil II), y (d) Calpulalpan

(a) Santa Lucía

Espesor (dm)	Penetrabilidad de raíces	Espacio poroso total (%)	Capacidad de aireación (%)	Capacidad de agua disponible (Lm ⁻²)	Capacidad de campo, 1m (Lm ⁻²)	Conductividad hidráulica (cm día ⁻¹)
3.0	Mediana	45	3	35.28	123.48	10-40
5.5	Muy buena	48	8	108.90	217.80	100-300
1.0	No aplica	46	18	10.00	14.00	100-300
4.7	No aplica	48	8	79.90	No aplica	100-300
3.8	No aplica	48	8	75.24	No aplica	100-300
Erodabilidad		0.4 (media)				

(b) El Horno (perfil I)

1	Mediana	50	5	15.84	44.55	40-300
1.4		50	5	22.18	62.37	40-300
2.6		49	4	38.61	115.83	100-300
1.1		42	4	12.28	38.87	10-40
1.6		39	16	15.36	22.08	40-100
2.3	Muy buena	38	9	42.78	62.03	10-40
1.5	No aplica	39	16	19.20	No aplica	40-100
3.8	No aplica	52	4	56.43	No aplica	40-300
2.7	No aplica	57	3	42.77	No aplica	40-300
Erodabilidad		0.6 (alta)				

(c) El Horno (perfil II)

0.7	Mediana	41	3	8.23	25.38	40-100
2.0	Muy buena	41	3	23.52	72.52	40-100
4.0	No aplica	38	22	22.00	32.00	40-100
6.3	No aplica	50	5	85.68	No aplica	40-300
5.0	No aplica	49	7	24.80	No aplica	40-100
Erodabilidad		0.5 (media)				

(d) Calpulalpan

2.6	Mediana	38	9	51.48	74.65	10-40
3.6	Mediana	41	3	42.77	131.87	40-100
Erodabilidad		0.5 (media)				

Tlaxcala, aproximadamente el 70% de la superficie consiste en suelos volcánicos que tienden a formar tepetates (9). La deforestación y las prácticas agrícolas que no contemplan la conservación del suelo dan como resultado la erosión del mismo propiciando la exposición de los tepetates. Aproximadamente 160,000 has bajo producción agrícola se encuentran en riesgo de convertirse en zona tepetatosa (20). Tradicionalmente los agricultores de la región han implementado prácticas de conservación como las terrazas, áreas de terreno comúnmente denominadas "metepantle", que están delimitadas por hileras de plantas de maguey (*Agave spp.*). Aunque esta práctica podría considerarse adecuada, su eficacia para reducir la erosión del suelo podría mejorarse substancialmente mediante la implementación de otras prácticas conservacionistas, tales como la exclusión de la labranza y la siembra en camas permanentes aplicada a todos los cultivos de la región.

Conclusiones

Los factores limitantes para la producción agrícola en la zona se relacionan principalmente con la disponibilidad de agua, los cambios en estructura y textura a lo largo de los perfiles, el bajo contenido de materia orgánica y el alto riesgo de erosión. Los horizontes arables en gran parte del área sólo tienen un espesor de unos 50 cm; abajo de estos

horizontes se encuentra el horizonte endurecido llamado tepetate. La exposición del tepetate a la superficie impedirá cualquier actividad agrícola. Debido a estas características, para Calpulalpan se recomienda la implementación de prácticas de agricultura de conservación con manejo adecuado de residuos de cosecha para reducir los niveles de erosión, usar de manera más eficiente el agua de lluvia, e incrementar el nivel de materia orgánica en el suelo. Dentro de la estación experimental de Santa Lucía, es recomendable excluir la experimentación sobre fertilización nitrogenada, ya que el alto nivel de este nutriente en el suelo no permite observar una clara respuesta. En la estación de El Horno, es fundamental caracterizar la variabilidad espacial del suelo para reducir los coeficientes de variación de los trabajos de investigación.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado mediante la beca doctoral del ir. B. Govaerts, otorgada por el Consejo Interuniversitario Flamenco (VLIR, por sus siglas en flamenco). Los autores agradecen a la Dra. J. Patton, del Departamento de Agricultura de Northwest Missouri State University, Maryville, EUA, por el enriquecedor intercambio de ideas, y a A. McNab por la revisión de este documento.

Referencias

1. Azooz R.H. & Arshad M.A., 1996, Soil infiltration and hydraulic conductivity under long term no-tillage and conventional tillage systems. *Can. J. Soil Sci.* 76, 143-152.
2. Bruce R.R., Langdale G.W. & Dillard, A.L. 1990, Tillage and crop effects on characteristics of a sandy surface soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 1744-1747.
3. Carter M.R., 1992, Characterizing the soil physical conditions in reduced tillage systems for winter wheat on a fine sandy loam using small cores. *Can. J. Soil Sci.* 72, 395-402.
4. Dixon J., 2003, Economic aspects of conservation agriculture –a global review of the profitability, risks and dynamics from the farmers' perspective. I. World Congress on Conservation Agriculture, Brazil.
5. Driessen P., Deckers J., Spaargaren O. & Nachtergaele F., 2001, Lecture notes on the major soils of the world. *World Soil Resource Reports 94*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma, Italia. 88 pp.
6. Elliot J.A. & Efetha A.A., 1999, Influence of tillage and cropping systems on soil organic matter, structure and infiltration in a rolling landscape *Can. J. Soil Sci.* 79, 457-463.
7. FAO, 1978, Report on the agro-ecological zones project (Vol. 1, Methodology and Results for Africa). *FAO World Soils Report 48*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma, Italia. 158 pp.
8. FAO, 1998, World reference base for soil resources. *World Soil Resource Reports 84*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma, Italia. 98 pp.
9. Guerrero E.E.G., Luna M.J.L. & Caballero O.E., 1992, Distribución de los Tepetates de la republica Mexicana escala 1:4.000.000. *Terra 10*, 131-150.
10. ISSS Working Group RB, 1998, World reference base for soil resources: introduction. Deckers J., Nachtergaele A. & Spaargaren O.C. (eds.) Primera edición. International Society of Soil Science (ISSS), International Soil Reference and Information Centre (ISRIC) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). ACCO. Leuven, Bélgica. 165 pp.
11. Schollenberger C.J. & Simon R.H., 1945, Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soil-ammonium acetate method. *Soil Sci.* 59, 13-24.
12. Schomberg H.H., Steiner J.L. & Unger P.W., 1994, Decomposition and nitrogen dynamics of crop residues: residue quality and water effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 372-381.
13. Secretaría de Programación y Presupuesto, 1981, *Síntesis Geográfica del Estado de México*. México.
14. Shaver T.M., Peterson G.A., Ahuja L.R., Westfall D.G., Sherrod L.A. & Dunn G., 2002, Surface soil properties after twelve years of dryland no-till management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1292-1303.
15. Siebe C., Jahn R. & Stahr K., 1996, Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo. *Publicación Especial 4*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, Edo. de México, México.
16. Smith S.J. & Sharpley A.N., 1990, Soil nitrogen mineralization in the presence of surface and incorporated crop residues. *Agron. J.* 82, 112-226.
17. Smith S.J. & Sharpley A.N., 1993, Nitrogen availability from surface-applied and soil-incorporated crop residues. *Agron. J.* 85, 776-778.
18. Soil Survey Staff, 1998, Keys to soil taxonomy. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C., USA.
19. Walkley A., 1947, A critical examination of rapid method for determining organic carbon in soils: effects of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63, 251-263.
20. Werner G., 1992, Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el Estado de Tlaxcala: Distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra 10*, 318-331.
21. Zebrowski C., 1992, Los suelos volcanicos endurecidos de America Latina. *Terra 10*, 15-33.

B. Govaerts, Belgian, MSc., Katholieke Universiteit Leuven, Department of Land Management and Economics, CIMMYT, Int. VLIR-UOS Research Associate.

M. Gabriela Barrera-Franco, Mexican, MSc., Research Associate UNAM.

A. Limón-Ortega, Mexican, Ph D, Researcher for the INIFAP-CEVAMEX Wheat Program.

Pablo Muñoz-Jiménez, Mexican, High school, Farmer.

K.D. Sayre, American, Ph D, CIMMYT, Int. Wheat Agronomist.

J. Deckers, Belgian, Ph D, Katholieke Universiteit Leuven, Department of Land Management, Professor Researcher.