

LAS CONDICIONES FISICAS, LA PRODUCCION AGRICOLA Y LA CALIDAD DEL SUELO¹

Warren Forsythe*

RESUMEN

Los recursos mundiales de suelo son finitos y se vuelven limitantes con relación a la población, ya que quedan pocas fronteras para el desarrollo, y el área existente de suelos desarrollados disminuye, debido a su degradación física, química y biológica. La estrategia que queda para la producción alimenticia es mayor rendimiento por hectárea, de manera sostenible. Será necesario manejar todos los factores de crecimiento del suelo para optimizar los rendimientos. El concepto de factores de crecimiento como propiedades de estado en el "proceso crecimiento-producción", tal como fue desarrollado por Jenny (1994) para sistemas agrícolas abiertos, se considera adecuado para identificar dichos factores dentro del gran número de propiedades del suelo. La ecuación de rendimiento descrita por Tisdale y Nelson (1975) hace esencialmente lo mismo. Los lógicos conceptos paralelos de la necesidad y suficiencia de los factores de crecimiento también son considerados para seleccionar un número mínimo de propiedades de suelo que cumplan con estas reglas. Esto se hace con base en la experiencia, la experimentación científica y el desarrollo consecuente de relaciones entre tales propiedades. Se discuten los factores físicos del suelo, la succión total de agua, la resistencia mecánica, la aeración y la temperatura, y se señala la sub-utilizada oportunidad de optimizar rendimientos mediante su manejo. La calidad del suelo se identifica como un grupo de atributos del suelo, que se seleccionan usando los conceptos lógicos y termodinámicos anteriormente mencionados, para formar un número mínimo de propiedades que describan

ABSTRACT

Physical conditions, agricultural production and soil quality. World soil resources are finite and are becoming limiting relative to population since there are few new frontiers for development left, and the area of existing developed soils is dwindling due to physical, chemical and biological degradation. The strategy that remains for food production is greater yield per hectare in a sustainable manner. It will be necessary to manage all the soil growth factors to optimize yields. The concept of growth factors as state properties in the *growth-production process*, as developed by Jenny (1941) for open agricultural systems, is considered in order to identify such factors from the large number of soil properties. The yield equation described by Tisdale and Nelson (1975) in essence does the same. The parallel logical concepts of the necessity and sufficiency of the growth factors are also considered in order to select a minimum number of soil properties which will comply with these rules. This is done on the basis of experience, scientific experimentation and the consequent development of relationships between the properties. The soil physical factors, total soil water suction, mechanical resistance, aeration and temperature are discussed, and the under used opportunity to optimize yields by their management is pointed out. Soil quality is identified as a group of soil attributes which are selected by the previously mentioned logical, and thermodynamic concepts from a minimum number of properties that completely describes the *soil degradation-soil improvement process*. The properties of soil quality can also be growth factors, such as nutrient content and mechanical resistance.

1/ Documento expuesto en el II Congreso Nacional de Suelos. Julio de 1996, San José, Costa Rica.

* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

completamente el "proceso de degradación-mejoramiento del suelo". Las propiedades de calidad de suelo pueden ser también factores de crecimiento, tales como contenido de nutrientes y resistencia mecánica. Propiedades de calidad de suelo, tales como estructura, incluyen los factores de crecimiento de la aireación y la resistencia mecánica. La materia orgánica no es un factor de crecimiento sino un parámetro de calidad del suelo. La clasificación de la capacidad de uso de la tierra considera muchas propiedades de calidad de suelo, las cuales han sido cuantificadas. Este no siempre es el caso con la clasificación de la capacidad de uso, donde los parámetros físicos a menudo sólo son evaluados por observación. Esto dificulta el monitoreo del proceso degradación-mejoramiento.

INTRODUCCION

Para suplir la creciente demanda de alimentos se debe aumentar la productividad de las tierras agrícolas o expandir la agricultura a nuevas áreas. Esto significa destruir bosques e iniciar el cultivo de tierras marginales incrementando las necesidades de riego y drenaje.

Los recursos de tierra del orbe son finitos. La extensión total de tierras en el mundo es de 13000 millones de ha, de las cuales sólo un 11% son arables (1440 millones de ha). Al existir menos tierra disponible, la expansión global de la agricultura se vuelve cada vez mas lenta. Así en los años 60 se incorporaron 46.5 millones de ha arables, en la siguiente década 39.1, y en los 80 26.5 millones de ha (Engelman y Le Roy 1995).

En adición, el recurso suelo se está reduciendo por su degradación como lo indican los Cuadros 1 y 2. Los procesos más importantes de degradación química son la disminución de materia orgánica y nutrimentos; mientras que los procesos dominantes de degradación física son la erosión, el encostramiento y la compactación. La reducción de la materia orgánica contribuye al deterioro de la estructura. Las costras superficiales limitan la emergencia de plántulas, la infiltración del agua y ésta, a su vez, reduce el agua disponible para las plantas. El suelo estructuralmente degradado produce menos biomasa, lo que resulta en una disminución de materia orgánica y

Soil quality properties such as structure include the growth factors, of aeration and mechanical resistance. Organic matter is not a growth factor but it is a soil quality parameter. Land capability classification considers many soil quality properties. However soil quality properties have been quantified. This is not always the case in land capability classification, where the physical parameters are often evaluated by observation. This makes monitoring the degradation-improvement process difficult.

cobertura protectora, repitiendo el ciclo de degradación (IBSRAM 1991).

Cuadro 1. Estimados de la degradación del suelo en Sur y Centroamérica (Oldeman 1994).

Proceso de degradación	Sudamérica	Centroamérica
	1 x 10 ⁶ ha	
Erosión hídrica	123	46
Erosión eólica	42	5
Degradación química	70	7
Degradación física	8	5

Cuadro 2. Causas de la degradación del suelo en Sur y Centroamérica (Oldeman 1994).

Causas/Actividades	Sudamérica	Centroamérica
Deforestación	100	14
Explotación excesiva	12	11
Sobrepastoreo	68	9
Actividades agrícolas	64	28
Bioindustrial y otras Actividades	—	—
Total	244	62

El Cuadro 3 indica el alto porcentaje de tierras con laderas en los países centroamericanos, el cual puede explicar en parte la importancia de

la erosión hídrica en la zona. Unos 46 millones de ha del área centroamericana de 271.6 millones de ha están afectadas por la erosión hídrica (17%). El Cuadro 4 indica los climas y períodos de crecimiento en América Central y América del Sur, y el Cuadro 5 muestran las limitaciones de los suelos de dichas zonas.

Cuadro 3. Porcentaje del área total nacional con zonas de ladera (Posner y McPherson 1981).

País	% del área nacional con pendientes > 8%
México	45
Guatemala	75
El Salvador	75
Honduras	80
Costa Rica	70
Panamá	80
Jamaica	60
Haití	80
República Dominicana	80
Colombia	40
Ecuador	65
Perú	50

Cuadro 4. Climas regionales dominantes (FAO-1984).

Clima	América del Sur	América Central
FRIO (con limitaciones de temperatura frígida)	0.8 (3.4)	0.7 (0.3)
CALIDO/FRESCO (sin limitaciones de temperatura frígida)		
Seco (0 días de lluvia)	81.2 (4.6)	35.6 (13.1)
Períodos insuficientes de crecimiento (1-74 días)	114.6 (6.5)	62.2 (22.9)
Períodos cortos de crecimiento (75-179 días)	230.4 (13.0)	63.2 (23.3)
Períodos largos de crecimiento (180-365 días)	1163.5 (65.7)	109.9 (40.4)
Húmedo durante todo el año (365 días)	119.7 (6.8)	—
Total	1770.2	271.6

Las cifras entre paréntesis son porcentajes de los totales.

La reducción por degradación de la productividad y del área de las tierras cultivadas ha estimulado la conciencia pública mundial sobre la relación de productividad y sostenibilidad de la agricultura.

La investigación agrícola y su financiamiento correspondiente es un elemento importante en un sistema agrícola sostenible. Antle y Wagenet (1995) sugieren que la investigación con financiamiento público debe dar alta prioridad a proyectos que proporcionan conocimiento para resolver problemas importantes de bien público. La investigación básica para comprender el impacto de la actividad humana sobre el ambiente es un ejemplo. El hecho de que el resultado de este tipo de investigación no siempre resulta en productos comerciales, tiende a desanimar la participación del sector privado. Este sector muestra más entusiasmo para financiar investigación que genere algún beneficio comercial, a pesar de que recientemente está comenzando a mostrar preocupación sobre temas de bien público.

Cuadro 5. Suelos regionales dominantes (FAO 1984).

Suelos con limitaciones	América del Sur	América Central
	10 ⁶ ha	
Suelos sin limitaciones propias de fertilidad	359.8 (20.3)*	118.9 (43.8)
Suelos con limitaciones graves de fertilidad	722.3 (40.8)	16.2 (6.0)
Suelos arcillosos muy agrietados	24.9 (1.4)	13.2 (4.9)
Suelos afectados por la sal	56.5 (3.2)	2.3 (0.8)
Suelos mal drenados	179.9 (10.2)	12.7 (4.7)
Suelos someros (< 50 cm)	193.6 (10.9)	60.6 (22.3)
Suelos de textura gruesa	132.4 (7.5)	15.9 (5.8)
Suelos semidesérticos y desérticos	93.9 (5.3)	31.8 (11.7)
Unidades de tierras diversas	6.9 (0.4)	—
Total	1770.2	271.6

*Las cifras entre paréntesis son porcentajes de los totales.

En los últimos años, los países desarrollados tienden a preocuparse más sobre la calidad de la comida, del ambiente y la salud que sobre la cantidad y disponibilidad de la comida. En cambio, en los países en desarrollo hay preocupación tanto sobre la disponibilidad de la comida como la degradación ambiental y la sostenibilidad (Antle y Wagenet 1995).

El manejo sostenible de tierras combina tecnologías, políticas y actividades destinadas a la integración de principios socioeconómicos con preocupaciones ambientales; en busca de aumentar la producción y los servicios, reducir el nivel de riesgos de producción, lograr estabilidad

ambiental conservando la calidad del suelo y el agua, y ser económicamente factible y socialmente aceptable (Bouma 1994, Dumanski et al. 1991).

La necesidad de aumentar la productividad de la agricultura significa tomar en cuenta todos los factores que inciden sobre ella. Tradicionalmente se buscaba la productividad máxima que fuera económicamente rentable, pero actualmente también se toma en cuenta la sostenibilidad. La calidad del suelo es un indicador de sostenibilidad y en su capacidad de producir bienes y servicios y regular el ambiente (Lal 1993). En este trabajo se enfocará hacia los factores físicos de la calidad de suelos y su productividad.

ECUACION DEL POTENCIAL DE CRECIMIENTO

Idealmente, los factores de crecimiento comprenden el número mínimo de factores que determinan, de manera directa, el crecimiento del cultivo. Los factores son únicos y se encuentran con la experiencia y la experimentación. Estos factores ideales se tratan como las variables independientes en una ecuación matemática.

$$C = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (\text{Ecuación 1})$$

El problema se puede mirar desde dos perspectivas:

En un caso, se pueden considerar C, X_1, X_2, \dots, X_n , como las propiedades que definen el proceso de crecimiento, las cuales comprenden el número mínimo de características o variables que describen y determinan completamente el estado del sistema (Lewis et al. 1961). En este caso, el proceso de crecimiento se tiene que considerar como uniforme y una función de valor único de las variables.

En otra perspectiva los factores X_1, X_2, \dots, X_n , se pueden considerar seguidos por el crecimiento C . La relación entre X_1, X_2, \dots, X_n y C forma una función de tipo causa-efecto en la cual los factores X_1, X_2, \dots, X_n , son necesarios (o indispensables) y suficientes para C (Ackoff et al. 1962). La palabra suficiente quiere decir que el juego de X_1, X_2, \dots, X_n , es completo para causar C y no falta ningún otro factor. El criterio de necesidad es aquel que se usa, por ejemplo, para calificar los elementos nutritivos. Esta relación causa-efecto se llama "causalidad determinística".

La experiencia, la experimentación y las pruebas críticas con base en los criterios mencionados arriba, determinan si un elemento es un factor de crecimiento. El conocimiento de fenómenos, procesos y mecanismos ayuda a interpretar el papel de un factor, y por tanto, a decidir si este es indispensable para el crecimiento de las plantas.

En el medio del suelo se han encontrado 4 factores físicos de crecimiento; la succión total del agua, la aireación, la temperatura y la resistencia mecánica a la penetración por las raíces (Shaw 1952, Forsythe 1967).

Muchas veces los factores que aparecen como factores de crecimiento no son únicos sino compuestos e inclusive pueden ser factores asociados con, o que dependen de un factor único. Una de las aplicaciones de la investigación científica puede considerarse como la aclaración de este tipo de confusión.

Jenny (1941) expresó una relación matemática que identifica factores de crecimiento. En términos generales estos se pueden tratar como propiedades de estado por lo que la ecuación sirve para ordenar el problema:

$$R = f(c_l, p, h, s, t) \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde: R = rendimiento; c_l = clima; p = planta; h = hombre; s = suelo y t = tiempo.

Las variables al lado derecho de la ecuación son factores compuestos que pueden dividirse para formar otros factores más básicos. Por ejemplo, el factor clima podría considerarse como un compuesto de temperatura, lluvia, luz y viento, y el factor suelo como los factores químicos, físicos y biológicos del mismo. La Ecuación 2 se refiere a un sistema de producción que incluye el suelo como un factor compuesto de crecimiento (o más específicamente aquí, de rendimiento). Si se quiere pensar en la productividad de suelos, hay que considerarlos bajo condiciones iguales de c_l, p, h y t , o sea, con estos factores mantenidos fijos, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$R = f(s)_{c_l, p, h, t} \quad (\text{Ecuación 3})$$

El factor compuesto suelo comprende, a su vez, varios factores: s_1, s_2, \dots, s_n . Si se quiere considerar un factor s_1 de crecimiento en el suelo se podría expresar así:

$$R = f(s_1) s_2 \dots s_n, cl, p, h, t \quad (\text{Ecuación 4})$$

El enfoque de Jenny en la Ecuación 2 es igual a su trato de los factores de formación de suelo desarrollados por Dokuchaev y Hilgard, como propiedades de estado (Wilding 1994). El valor de este concepto para ordenar y conceptualizar estudios de sistemas abiertos de pedología y el análisis de ecosistemas, ha sido reconocido por una publicación especial de la Sociedad Norteamericana de Ciencias del Suelo (SSSA 1994).

Se ha visto que, idealmente, las variables que se usan para describir un proceso tienen que ser independientes o indispensables para el proceso. Si una variable no es indispensable para el proceso no debe aparecer en la ecuación. Por ejemplo, para estimar el rendimiento de los cultivos no se considera la intensidad de las ondas sísmicas (aunque últimamente hay rumores de lo contrario) o la intensidad magnética. Entonces *estas* variables, además de no ser indispensables, ni siquiera son influyentes y por lo tanto, no aparecen en la *ecuación de rendimiento*.

El mismo principio se aplica a varias propiedades del suelo. De esta manera, propiedades como el contenido de arcilla, CIC, MO, y la densidad aparente no llenan los requisitos para ser factores de crecimiento (rendimiento), porque no son indispensables para el crecimiento de la planta. Claro que estas propiedades influyen en los factores de crecimiento y por eso muchas de estas propiedades son confundidas por factores de crecimiento. Sin embargo, estas propiedades influyentes no son la única fuente de los factores de crecimiento y, por lo tanto, no son indispensables.

EL CRECIMIENTO Y LOS FACTORES FÍSICOS DEL SUELO

La succión total del agua

La humedad de un suelo agrícola sigue ciclos entre un límite superior de la capacidad de campo y un límite inferior del punto de marchitez según el clima (balance hídrico) y el riego. Cuando el suelo se seca o cuando las plantas extraen agua del suelo, el secamiento en el perfil es diferencial, siendo la parte superior más seca en un principio.

El balance hídrico atmosférico para un período dado es la diferencia entre la lluvia y la

evapotranspiración. Cuando el balance hídrico es positivo, el exceso de agua sirve para aumentar la humedad del perfil hasta la capacidad de campo, ya que el agua sobrante se drena hacia abajo. Si el balance hídrico es negativo, la humedad del suelo empieza a disminuir. El principio del balance hídrico ha sido usado con algún éxito para estimar la humedad del suelo y los períodos de crecimiento. Un análisis estadístico de las lluvias puede dar información sobre la lluvia confiable, la cual, a su vez, daría información sobre períodos de crecimiento confiables (Hargreaves 1976).

Cuando el suelo se seca, su humedad disminuye y su energía también disminuye. El crecimiento y rendimiento de cada cultivo responde a la energía del agua del suelo en una curva de respuesta. Cuando el suelo está más seco, la atracción agua-suelo es más fuerte. Dicha atracción se ha denominado succión matricial y se expresa en megapascals (MPa).

Generalmente, una arcilla montmorillonítica tiene mayor atracción que una caolínica o de sesquióxidos, y un suelo más fino tiene mayor atracción que uno arenoso. Hay que tomar en cuenta el efecto osmótico de las sales disueltas en la solución del suelo sobre las raíces que tienen membranas semipermeables. Dicho efecto se denomina succión osmótica. La suma de la succión matricial y la succión osmótica se llama la succión total. En la mayoría de los suelos, excepto los salinos, el componente de succión osmótica es pequeño.

Se han escogido valores críticos de la succión del agua del suelo de las curvas de respuesta de varios cultivos y dichos valores indican la succión máxima que debe experimentar el suelo para evitar grandes pérdidas del rendimiento máximo. Algunos de estos valores para cultivos son: frijoles (27-R) 0.08 MPa a 5 cm de profundidad ó 0.06 MPa a 15 cm de profundidad (Forsythe y Legarda 1978), caña de azúcar 0.15-0.20 MPa, papas 0.2-0.3 MPa, algodón mayor de 0.4 MPa y menor de 0.7 MPa, hortalizas, en general, 0.1 MPa, cacao (estimado) 0.02-0.03 MPa (0-30 cm), banano 0.03-0.15 MPa, cebolla 0.065-0.1 MPa (30-40 cm) (Hagan y Stewart 1972), arroz de secano (1R747B2-6-3) 0.017 MPa (De Datta et al. 1974).

Espacio aéreo y aireación del suelo

El CO₂ producido como resultado de la respiración de las raíces, fauna y microorganismos

se acumula en el suelo y así su concentración aumenta, llegando a niveles mucho mayores que los existentes en la atmósfera. La gradiente de concentración producida provoca la difusión de CO_2 hacia afuera del suelo. Por otro lado, el consumo de O_2 en el suelo produce un gradiente de concentración que provoca la difusión de O_2 hacia adentro del suelo. La difusión es el mecanismo más importante de intercambio de gases entre el aire del suelo y la atmósfera. La difusividad del suelo o sea su capacidad de permitir la difusión depende del espacio aéreo del suelo con continuidad.

Espacio aéreo = porosidad total-humedad volumétrica
(Ecuación 5)

La Ecuación 5 indica que si la humedad aumenta, como en el caso de suelos con mal drenaje interno, el espacio aéreo se reduce, y también, si su porosidad total se reduce como en el caso de la compactación del suelo, ocurre lo mismo. Se ha encontrado que cuando el espacio aéreo de los suelos aumenta a 5-10% empieza a permitir la difusión (Wesseling y Van Wijk 1957, Xu et al. 1992, Jin et al. 1996), lo que significa que el espacio aéreo se vuelve continuo a dichos valores. Cuando no hay datos específicos para un cultivo se ha usado un valor crítico de 10%. El espacio aéreo correlaciona bien con la tasa de difusión de oxígeno (RDO), y se puede usar como un índice de la aireación. Se consiguen curvas de rendimiento en relación con el espacio aéreo. Algunos valores críticos son 11% para caña de azúcar (Robinson 1964), 25% para frijol (Legarda y Forsythe 1978) y 25% para tomate (Flocker et al. 1959). En cambio, cultivos como el arroz y la malanga (*Colocasia esculenta* var. *escuelenta*), crecen bien en suelos anegados.

Temperatura del suelo

La superficie del suelo se calienta cuando absorbe la radiación solar de onda corta. También se calienta el aire sobre él y se proporciona el calor latente de evaporación del agua del suelo. La superficie del suelo refleja parte de las ondas cortas y, por su calentamiento, genera radiación de onda larga. La tasa de flujo de calor en el suelo depende de la gradiente de temperatura y la conductividad térmica. Un suelo con mayor humedad tiene mayor capacidad calórica debido a la

alta capacidad de calor del agua. Por lo tanto, un suelo mojado se calienta menos que uno seco cuando absorbe cierta cantidad de calor y viceversa. La conductividad térmica de un suelo se reduce al secarse. En Sapporo, Japón, de 35° N de latitud, se notaba que durante un día despejado de verano una arena llegaba a una temperatura máxima de 55°C a 0 cm mientras una arcilla que contenía más humedad tuvo una máxima de 35°C. A 5 cm de profundidad la temperatura máxima de la arena fue de 40°C y aquella de la arcilla 32°C (Yakuwa 1946, Chang 1968). Una caminata sin zapatos sobre arena seca en una playa a las 11 de la mañana puede comprobar estas observaciones.

En las zonas tropicales, las fluctuaciones estacionales de la temperatura del aire y del suelo son menores que en la zona templada y las fluctuaciones diurnas son más importantes. A más de 20 cm de profundidad hay muy poca variación (Hardy 1970). Los datos de temperatura, tomados durante seis años, para un suelo desnudo de la serie Margot en Turrialba muestran promedios anuales de 26.4, 25.7; 25; 25.3 y 25.4°C para 2, 5, 10, 20 y 50 cm de profundidad respectivamente (Forsythe 1976), cuando la temperatura media del aire fue de 21.6°C. El lugar tiene latitud 9° 53' N y longitud 83° 39' O con una elevación de 602 msnm. La lluvia anual promedio es de 2662 mm y la radiación solar diaria promedio es de 17.4 MJ/m². Generalmente un aumento de 100 m de elevación está acompañado por un descenso de 0.6°C en la temperatura media anual del aire; esto afecta la temperatura del suelo en forma similar (Van Wambeke 1992). La temperatura óptima para plantas en el trópico es de 25-30°C.

La temperatura del suelo influye sobre las actividades de las raíces y de los microorganismos del suelo. Según el cultivo, una temperatura demasiado alta o demasiado baja puede inhibir el desarrollo y funcionamiento de la planta. La temperatura de las capas superficiales del suelo influye sobre la germinación de semillas. Se han observado problemas con germinación en suelos arenosos en el trópico debido a las temperaturas máximas altas durante el día en las capas superficiales. Un Typic Torripsamment con 94% de arena, 3% de limo y 3% arcilla tiene una humedad volumétrica de 7.7% a 0.033 MPa de succión y 3% a 1.5 MPa con 4.7% de agua disponible para la planta (ADP). Los valores de humedad son bajos y permiten un fácil calentamiento del suelo.

En cambio un Tropeptic Eutrothox con 9.3% de arena, 5.2% de limo y 85.5% de arcilla tiene la humedad volumétrica de 42.1% a 0.033 MPa y 40% a 1.5 MPa con 2.1% de ADP. Estos dos suelos tienen poco ADP pero los valores de humedad del segundo suelo no se prestan a un calentamiento fácil. Se puede apreciar que la temperatura del suelo se controla mediante el drenaje (para calentar) el riego (para enfriar), la sombra y el mantillo muerto o vivo.

Resistencia mecánica

Veihmeyer y Hendrickson (1948) encontraron que en girasol, ninguna raíz penetró ningún suelo con una densidad aparente de 1.9 Mg/m³ o mayor. En algunos suelos los valores limitantes fueron de 1.7 a 1.8 pero en arcillas los valores fueron de 1.6-1.7. En la arcilla Aiken (suelo latosólico) el valor crítico fue de 1.46. Se ha notado que el estado de empaquetamiento y la historia previa influyen mucho en la resistencia del suelo a un penetrómetro y, por lo tanto, la densidad aparente es un índice de resistencia con muchas fallas (Pearson 1966). Es muy difícil aplicar los criterios de Veihmeyer y Hendrickson a otros suelos especialmente a Ultisoles que pueden tener una densidad aparente natural de 1.0 Mg/m³ y Andisoles que pueden tener una densidad aparente natural de 0.5 Mg/m³.

Taylor y Gardner (1963) correlacionaron la densidad aparente versus la penetración por raíces (r=-0.59), mientras la resistencia medida por un penetrómetro estático versus la penetración por raíces tenía un coeficiente de correlación de -0.96. Usando el mismo aparato con un pistón de acero inoxidable de 5 mm de diámetro, Taylor y Burnett (1964) encontraron que la resistencia en MPa experimentada para introducir este pistón en un suelo donde no había penetración por raíces, fue un esfuerzo de 2.5-3.0 MPa y esto se encontró para los siguientes cultivos: algodón (*Gossypium hirsutum*), *Sesamum Indicum*; *Cyamopsis tetragonolobus*; *Sesbania exaltata*; *Phaseolus aureus*, *Vigna simensis* (Var. Chinese Red) y sorgo (*Sorghum vulgare*) variedad Sumac. Forsythe y Huertas (1979) encontraron una curva de rendimiento versus resistencia en la que una resistencia de 2 MPa a capacidad de campo en la zona 0-25 cm de suelo, provocó una reducción de 40% del rendimiento máximo para la variedad de frijol 27-R.

Hay varios tipos de penetrómetros; el mencionado anteriormente es del tipo portátil. Existe un banco de datos que permite usar las lecturas del penetrómetro y evaluar el potencial del suelo para crecimiento de cultivos. Forsythe y Tafur (1985) presentaron la siguiente evaluación: 0-0.6 MPa excelente; 0.7-1.2 MPa aceptable; 1.3-2.5 MPa no aceptable y >2.5 MPa no hay penetración por las raíces.

LA CALIDAD DEL SUELO

El término calidad del suelo se refiere a los atributos o propiedades del suelo y su capacidad de interactuar con los insumos aplicados. Como es dinámica, se está mejorando, sosteniendo o degradando (Figura 1).



Fig. 1. La calidad del suelo y el proceso mejoramiento-degradación.

Larson y Pierce (1991) definen la calidad del suelo como su capacidad de funcionar dentro de límites ecológicos y de interactuar positivamente con el ambiente externo al ecosistema. En esta definición, la calidad del suelo es un factor importante en los 4 objetivos de sostenibilidad indicados por Lourance (1990): sostenibilidad agronómica, sostenibilidad ecológica, sostenibilidad microeconómica y sostenibilidad macroeconómica. La sostenibilidad agronómica trata la capacidad de un terreno de mantener la productividad agrícola con el tiempo. La sostenibilidad ecológica es la capacidad de los sistemas que apoyan la vida; la capacidad de mantener la calidad del ambiente. La sostenibilidad microeconómica se trata de la capacidad de una finca a permanecer económicamente solvente, y la sostenibilidad macroeconómica es la capacidad de los sistemas nacionales de producción de competir en mercados domésticos e internacionales.

Además de la productividad del suelo, la calidad trata sobre la función del suelo en regular

el ambiente. En el contexto de la calidad del suelo, los conceptos de atributo, propiedad, características y calidad son sinónimos (Larson y Pierce 1994).

La calidad del suelo se ha definido así:

$$Q = f(q_1 \dots n), \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde Q = la función de las calidades individuales q_i del suelo.

Es importante saber el cambio de Q (dQ) para detectar si el suelo va en un camino de mejoramiento o de degradación, en relación con su estado al tiempo t_0 .

$$dQ = f[(q_{it} - q_{i0}) \dots (q_{nt} - q_{n0})] \quad (\text{Ecuación 7})$$

El tiempo podría indicar la iniciación del uso humano (largo plazo) o un cambio reciente en el manejo (corto plazo). Se sugiere representar dQ como una fracción o porcentaje de cambio para eliminar dimensiones en la ecuación (Larson y Pierce, 1994). La evaluación de Q como adecuado dependería de pautas establecidas de acuerdo con la experiencia y la experimentación. El valor de Q podría ser un producto compuesto por los varios q expresados como porcentajes, tal como la elaboración del índice de Storie para la productividad de un suelo agrícola. Al igual que el sistema

diagnóstico de la salud humana, el cual incluye la medición de propiedades tales como la temperatura, presión sanguínea, el pulso, etc., hay propiedades o atributos del suelo que se pueden usar como indicadores de su calidad (salud).

En forma más concreta, la calidad del suelo es un complejo de sus propiedades físicas, químicas y biológicas que proporcionan a) un medio para el crecimiento de la planta, b) la regulación y distribución del flujo de agua en el ambiente y c) un filtro ambiental eficaz. Estas funciones se pueden desglosar así:

- Aceptar, retener y liberar nutrientes y otros componentes químicos.
- Aceptar, retener y liberar agua a las plantas, ríos y aguas subterráneas.
- Promover y sostener el crecimiento de las plantas.
- Mantener un hábitat biótico adecuado.
- Responder al manejo y resistir la degradación.

El Cuadro 6 indica la relación entre algunos atributos del suelo y las funciones involucradas con la calidad del suelo. Por ejemplo, la textura y el carbono orgánico están relacionados con las 5 funciones.

Cuadro 6. Relación de los atributos del suelo con funciones relacionadas con la calidad del suelo.

Atributos del suelo	Funciones relacionadas con la calidad de suelo				
	Aceptar, tener, liberar nutrientes	Aceptar, tener, liberar agua	Promover crecimiento	Mantener un hábitat adecuado	Resistir degradación
Horizonte superficial					
Materia orgánica total	X	X	X	X	X
Materia orgánica lábil	X	-	X	X	X
Nutrientes	X	-	X	X	X
Textura	X	X	X	X	-
Profundidad	X	X	X	-	X
Estructura	X	X	-	X	-
pH	X	X	X	X	X
Conductividad eléctrica	X	-	X	X	X
Horizonte limitante					
Textura	X	X	X	X	X
Profundidad	X	X	X	-	X
Estructura	X	X	X	-	-
pH	X	-	X	-	X
Conductividad eléctrica	X	-	X	X	X

Indicadores de la calidad del suelo

Como medio que promueve el crecimiento de las plantas, el suelo proporciona un volumen adecuado para el desarrollo de las raíces de acuerdo con su profundidad efectiva y los requisitos de las plantas. Los factores químicos de crecimiento son los nutrientes esenciales, y las sustancias tóxicas como Al. La capacidad de fijación del suelo para un nutriente dado y el pH del suelo influyen sobre muchos de dichos factores. Los factores físicos de crecimiento son la succión total del agua del suelo, la aireación (espacio aéreo), la resistencia mecánica y la temperatura. La succión total se puede estimar por la humedad del suelo y la conductividad eléctrica del extracto saturado. En lugares con mal drenaje, la aireación se puede estimar por la profundidad del nivel freático. Los factores biológicos de crecimiento son las plagas, las enfermedades y las sustancias orgánicas alelopáticas.

La condición de la superficie del suelo determina su capacidad para regular y distribuir el flujo de agua en el ambiente. La lluvia que cae sobre el sistema suelo-planta en parte infiltra el suelo, o escurre sobre la superficie en forma no erosiva o erosiva. El agua infiltrada se puede almacenar y usar para las plantas, o percolar profundamente para formar agua subterránea que luego emerge en nacimientos y ríos. El agua subterránea puede llevar químicos disueltos consigo, perderlos por adsorción o adquirirlos por la liberación por el suelo. En suelos con pendientes, el agua escurrida erosiva puede llevar suelo y nutrientes de la superficie a los lagos o ríos. El agua escurrida no erosiva puede llevar químicos disueltos a los mismos destinos. Si el suelo es de poca pendiente, el encharcamiento puede reducir

la aireación y, por lo tanto, la producción de los cultivos. Si el sistema suelo-planta no tiene cobertura protectora contra el impacto de las gotas de lluvia se pueden formar sellamientos con costras. Estos a su vez, junto con la compactación provocada por el manejo, favorece más aún el escurrimiento y el encharcamiento.

El destino de los desechos es un problema humano creciente. El suelo puede actuar como un filtro ambiental eficaz porque la matriz tiene una área superficial enorme y es una zona importante de adsorción y reacción para la transformación y descomposición de los desperdicios orgánicos y otras sustancias químicas. La capacidad de intercambio de cationes y de formar complejos aumenta dicha capacidad. Cuanto más fina la textura del suelo, mayor es el área superficial por unidad de masa donde la población microbiana es el agente transformador más importante de las sustancias químicas. Muchas de las transformaciones importantes en el suelo son aeróbicas y necesitan aireación adecuada. Mediante la dispersión hidrodinámica, el suelo puede diluir la concentración de una sustancia agregada al agua del suelo, mientras que se desplaza en la corriente de flujo que ocurre.

Juego mínimo de datos (JMD)

Se ha visto que varias propiedades o atributos del suelo intervienen en la calidad del suelo y su cambio, por lo que, como en el caso de los factores de crecimiento, hay que escoger propiedades indispensables para describir la calidad del suelo. Larson y Pierce (1991) han escogido las propiedades presentadas en el Cuadro 7. Aprecian que los atributos que definen la calidad del suelo varían con el ecosistema y la función del

Cuadro 7. Los atributos del suelo que forman un juego mínimo de datos según Larson y Pierce (1991).

Atributo del suelo	Método de medición
Suministro de nutrientes	Análisis químico
Carbón total	Combustión mojada o seca
Carbón lábil	Digestión con KCl
Textura	Método de la pipeta o del hidrómetro
Agua disponible para la planta	Curvas de retención de humedad o en el campo
Estructura	Densidad aparente y conductividad hidráulica
Resistencia	Densidad aparente o resistencia a la penetración
Profundidad máxima de raíces	La profundidad de raíces de cada cultivo
pH	Electrodo de pH
Conductividad eléctrica (CE)	CE del extracto saturado

suelo. También se ha usado el criterio de que el atributo debe ser uno cuyo cambio se puede medir dentro de un lapso de tiempo relativamente corto (meses o años en lugar de décadas).

Se deben considerar ciertas características fijas del suelo, tales como la pendiente y su posición fisiográfica por su influencia sobre el ambiente. Otros factores ambientales importantes en Costa Rica y Centroamérica son el grado de cobertura, temperatura, la lluvia confiable, la lluvia máxima con intervalo de retorno de 5 años y la evapotranspiración potencial.

Suministro de nutrimentos

El suministro de nutrimentos influye en la productividad del suelo. En la mayoría de los países se han desarrollado técnicas de análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo.

Humedad del suelo

La evaluación de los factores físicos de crecimiento incluye mayormente la humedad del suelo medida a través del análisis de la lluvia y la temperatura mediante los datos climáticos. La aireación y la resistencia mecánica deben ser evaluadas más ampliamente.

Carbono orgánico (CO)

Hayek et al. (1990) sostienen que la cantidad de CO es el atributo del suelo que tiene un efecto dominante sobre su productividad. Las prácticas que aumentan el CO también con toda probabilidad van a aumentar su productividad. Esto concuerda con la idea anteriormente expresada de que el CO no es un factor de crecimiento en sí, sino que está correlacionado con otros factores que producen biomasa. Es decir, el CO es parte de la biomasa producida. La reducción del CO está acompañada por la disminución de los nutrimentos, la agregación de las partículas, la retención del agua disponible (en suelos arenosos) y la porosidad (aumento de densidad aparente). Todo esto, resulta en reducción de la infiltración y aumento del escurrimiento (Frye et al. 1985).

Textura (T)

Generalmente un suelo que se encuentre entre los extremos de textura arenosa y arcillo-

sa pegajosa se considera apto para la agricultura. Si la textura del suelo superficial es diferente de aquella del subsuelo, la erosión provocaría un cambio de textura. Si el subsuelo tiene más arcilla, la erosión expondría este horizonte lo cual puede ocasionar menos infiltración, y más escurrimiento y erosión (Frye et al. 1985). Si el subsuelo es arenoso, la erosión provocaría un aumento en la arena y esto ocasionaría una reducción en la retención de agua y mayor infiltración. Los suelos más arenosos se prestan más a la compactación (Frye et al. 1985).

Agua disponible para la planta (ADP)

Un atributo importante del suelo es su capacidad de almacenar agua y luego liberarla a la planta. Durante el ciclo de producción, un cultivo puede sufrir períodos de déficit cuando la evapotranspiración sobrepasa la lluvia y el suelo se seca.

A medida que el suelo se seca, la succión total del agua del suelo aumenta y ésta reduce el rendimiento del cultivo. En cuanto menor es el ADP, mayor es la succión desarrollada. El ADP está afectado también por la profundidad de las raíces. En el trópico húmedo-seco ocurren a menudo períodos erráticos de 10-20 días sin lluvia durante la época lluviosa, conocidos como "veranillos" o "canículas" en Costa Rica y "veranicos" en Brasil. La frecuencia del riego determina el grado de succión desarrollada en su aplicación. Las curvas de retención de humedad de muestras no alteradas dan información para el ADP. Las curvas de retención de muestras de Andisoles secadas al aire dan valores muy bajos de ADP (Forsythe y Vázquez 1973).

Estructura

Kay (1989) indica que la estructura del suelo comprende 3 componentes: 1) la forma estructural, la cual se refiere a la geometría del espacio poroso, la distribución del tamaño de los poros y su continuidad; 2) la estabilidad de los agregados, la cual se refiere a la distribución del tamaño de los agregados y su resistencia a la degradación; y 3) la capacidad de recuperación de la estructura de su condición degradada. Las mediciones de la forma estructural incluyen la densidad aparente (porosidad) y el volumen de macroporos (poros > 60 mm de diámetro o poros > 10 mm de diámetro cuando se trata de agua infiltrable).

También incluye la conductividad hidráulica saturada. Las curvas de retención de humedad de muestras con la estructura del campo (muestras no alteradas) se usan para determinar poros grandes.

Profundidad de raíces (PR)

El suelo debe proporcionar un espacio adecuado para el desarrollo de las raíces, tanto de las plantas maduras como de aquellas en estado de germinación. Esto está relacionado con el almacenaje de nutrimentos y agua para las plantas y la posibilidad de que el árbol desarrolle un buen soporte mecánico. La evaluación de la profundidad de capas duras que impiden el crecimiento radical es importante para determinar la profundidad efectiva del suelo, y para este fin se han usado la resistencia a la penetración y la densidad aparente.

pH

El pH del suelo da información sobre la solubilidad de varios nutrimentos y otros compuestos, la actividad de microorganismos, el grado de saturación de bases, la presencia de Al intercambiable y de CaCO_3 .

Conductividad eléctrica (CE)

La CE se usa para evaluar las sales solubles en el suelo. La CE del extracto saturado hasta 2 dS/m es una medida integrada de los nutrimentos en el suelo. También se usa para estimar la succión osmótica de la solución del suelo. Valores de CE de 4 a 12 dS/m pueden significar una reducción del 50% en el rendimiento de algunos cultivos.

Funciones de pedotransferencia (FP)

Bouma (1989) define las funciones de pedotransferencia como funciones matemáticas que describen relaciones entre propiedades del suelo. Muchas FP son de naturaleza empírica, lo que generalmente limita su aplicabilidad a la región donde fue desarrollada. La profundidad del nivel freático y el espacio aéreo se usan como índices de aireación y son ejemplos de funciones de pedotransferencia.

LA CAPACIDAD DE USO DE LAS TIERRAS Y LA CALIDAD DEL SUELO

La clasificación de la capacidad de uso de las tierras agrícolas contempla la profundidad del suelo y su pendiente en relación con los riesgos de erosión bajo varios tipos de uso de la tierra. Su filosofía general contempla algunas ideas de la calidad del suelo porque considera riesgos de erosión, drenaje, capas que restringen el desarrollo de las raíces, salinidad, cantidad de nutrimentos y acidez como factores limitantes en la producción agrícola. En la práctica, se estiman por observación, pero no se miden, muchos de los atributos físicos de la calidad del suelo. Por ejemplo, no se cuantifica la naturaleza hidráulica de la superficie del suelo, la característica hidráulica del perfil, ni la retención del ADP. Entonces, es difícil monitorear los cambios de los atributos para determinar si hay degradación o mejoramiento de los suelos.

CONCLUSION

Los problemas actuales de aumento de la población mundial, degradación del ambiente, y la decreciente oportunidad de cultivar nuevas tierras, presenta nuevas pautas en la producción agrícola: 1) aumentar la productividad aprovechando el manejo de todos los factores de crecimiento, 2) lograr la rentabilidad, y 3) lograr la sostenibilidad. Pautas para regular los factores químicos y físicos de crecimiento se han desarrollado. El manejo de los factores químicos se practica bien mediante técnicas de fertilización. Existe la oportunidad de ampliar el manejo de los factores físicos de aireación y resistencia mecánica mediante un diagnóstico temprano de compactación, drenaje interno y superficial, métodos de cultivo, manejo de residuos, y la labranza adecuada. La succión total se puede manejar mediante el riego controlado, el drenaje para controlar la salinidad, el mantillo muerto, la fecha de siembra y el control de la profundidad radical para la agricultura de secano. En zonas templadas, el control de bajas temperaturas en el suelo durante la germinación se ha logrado con la fecha de siembra y el drenaje. En zonas tropicales, el control de la temperatura no es tan crítico, excepto en suelos arenosos. El riego y el mantillo muerto se puede usar para este fin.

Hay que investigar y establecer pautas para evaluar algunos atributos de la calidad del suelo que tratan la función de la regulación ambiental. Un ejemplo es el comportamiento hidráulico de la superficie del suelo. La clasificación de la capacidad de uso de las tierras agrícolas tiene una filosofía que incluye algunas ideas de la calidad del suelo, pero los atributos físicos se estiman por observación en lugar de medirlos. Esto dificulta el monitoreo de la degradación.

LITERATURA CITADA

- ACKOFF, R.L.; GUPTA, S.K.; MINAS, J.S. 1962. Scientific method. John Wiley. 464 p.
- SHAN, B.T. 1952. Soil physical conditions and plant growth. Madison, Wis., ASA, Agronomy II. 491 p.
- ANTLE, J.M.; WAGENET, R.J. 1995. Why scientists should talk to economists. *Agronomy Journal* 87:1033-1040.
- BOUMA, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science* 9:177-213.
- BOUMA, J. 1994. Sustainable land use as a future focus for pedology? *Soil Science of America Journal* 58:645-646.
- CHANG, JEN-HU. 1968. Climate and agriculture. Chicago. Aldine Publishing. 304 p.
- DE DATTA, S.K.; FAYE, F.G.; MALLICK, R.H. 1994. Relaciones del agua y el suelo en el arroz seco. In *Manejo de suelos en la América Tropical*. Ed. por E. Bormisza y A. Alvarado. Raleigh, NCSU-Soil Science Department. p. 172-190.
- DUMANSKI, J.; ESWARAN, H.; LATHAM, M. 1991. A proposal for an international framework for evaluating sustainable land management. In *Evaluation for sustainable land management in the developing world*. Volume 2: Technical Papers. Ed. by Dumanski. Bangkok, Thailand. IBSRAM Proceedings 12(2):25-43.
- ENGELMAN, R.; LE ROY, P. 1995. Conserving land: population and sustainable food production. Washington, D.C. Population Action Program. 48 p.
- FAO. 1984. Capacidades potenciales de carga demográfica de las tierras del mundo en desarrollo. Roma, FAO-Informe técnico del Proyecto INT/75/P13. 141 p.
- FLOCKER, W.J.; VOMOCIL, J.A.; HOWARD, F.D. 1959. Some growth responses of tomatoes to soil compaction. *Soil Science Society of America Journal* 23:188.
- FORSYTHE, W.M. 1967. Las propiedades físicas, los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. *Fitotecnica Latinoamericana* 4:165-176.
- FORSYTHE, W.; VAZQUEZ, O. 1973. Effect of air-drying on the water retention curves of disturbed samples of three soils of Costa Rica derived from volcanic ash. *Turrialba* 23:200-207.
- FORSYTHE, W. 1976. Las condiciones físicas del suelo y la producción. In *Curso intensivo sobre sistemas de producción agrícola para el trópico*. (Turrialba, Costa Rica, 1975). Turrialba, Costa Rica, CATIE.
- FORSYTHE, W.M.; LEGARDA, L. 1978. Soil water and aeration and red bean production. I. Mean maximum soil moisture suction. *Turrialba* 28:81-86.
- FORSYTHE, W.M.; HUERTAS, A. 1979. Effect of soil penetration resistance on the growth and yield of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). 27-R variety. *Turrialba* 29:293-298.
- FORSYTHE, W.; TAFUR, N. 1985. The effect of various methods of land preparation on soil resistance to penetration and yields of corn (*Zea mays* L.), cassava (*Manihot esculenta* CRANTZ), and sweet potato (*Ipomea batatas* L.) in association. I. Effect of cropping systems and land preparation on the soil. *Turrialba* 35:357-370.
- FRYE, W.W.; BENNETT, O.L.; BUNTLEY, G.J. 1985. Restoration of crop productivity on eroded or degraded soils. In *Soil Erosion and Crop Productivity*. Ed. by R. Follet and B.A. Stewart. Madison, Wisconsin, ASA. p. 339-354.
- HAGAN, R.M.; STEWART, J. 1972. Water deficit-irrigation design and programming. *Proceedings American Society Civil Engineering*. (IRS):215-237.
- HARDY, F. 1970. *Edafología tropical*. México. Herrero Hermanos. 416 p.
- HARGREAVES, G.W. 1976. Monthly precipitation probabilities and moisture availability for Costa Rica. Utah State University. Working paper 76-E 162. 34 p.
- HAJEK, B.F.; KARLEN, D.L.; LOWERY, B.; POWER, J.F.; SCHUMAKER, T.E.; SKIDMORE, E.L.; SOJKA, R.E. 1990. Erosion and soil properties. In *Research issues in soil erosion productivity*. Ed. by W.E. Larson, G.R. Foster, R.R. Allmaras and C.M. Smith. St Paul, University of Minnesota. P.23-40.
- IBSRAM. 1991. Evaluation for sustainable land management in the developing world. Bangkok, Thailand. IBSRAM Proceedings 1(2):14-15.
- JENNY, H. 1941. *Factors of soil formation*. Mc Graw Hill. 281 p.
- JIN, Y.; JURY, W. 1996. Characterizing the dependence of gas diffusion coefficient on soil properties. *Soil Science Society of America Journal* 60:66-71.
- KAY, B.D. 1989. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science* 12:1-52.

- LAL, R. 1993. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil and Tillage Research* 27:1-8
- LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. In *Evaluation for sustainable land management in the developing world*. Ed. by Dumanski et al. IBSRAM Proceedings 12(2):175-203.
- LEGARDA, L; FORSYTHE, W. 1978. Soil water and aeration and red bean production. II. Effect of soil aeration. *Turrialba* 28:175-178.
- LEWIS, G.N.; RANDALL, M.; PITZER, K.S.; BREWER, L. 1961. *Thermodynamics*. New York. Mc Graw-Hill. 723 p.
- LOURANCE, R. 1990. Research approaches for ecological sustainability. *Journal of Soil and Water Conservation* 45:51-54
- OLDEMAN, L.R. 1994. The global extent of soil degradation. In *Soil resilience and sustainable land use*. Ed. by D. Greenland, and J. Szaboles. Wallingford U.K., CAB International. 99-118 p.
- PEARSON, R. W. 1966. Soil environment and root development. In *plant environment and efficient water use*. Madison, Wis., American Society of Agronomy. 295 p.
- POSNER, J.L.; MC PHERSON, M. 1981. Las áreas de ladera de México, Centroamérica, El Caribe y los países Andinos: situación actual y perspectivas para el año 2000. In *Seminario internacional sobre producción agropecuaria y forestal en zonas de ladera de América tropical*. CATIE-ROCKEFELLER FOUNDATION. p. 91-107.
- ROBINSON, F.E. 1964. Required percentage air space for normal growth of sugar cane. *Soil Science* 98:206-207.
- SSSA. 1994. *Factors of soil formation: A fiftieth anniversary retrospective*. Madison, Wis., USA, Soil Science Society of America. SSSA Special Publication. 33:160.
- TAYLOR, H.M.; GARDNER, H.R. 1963. Penetration of cotton seedling tap roots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Science* 96:153-156.
- TAYLOR, H.M.; GARDNER, H.R. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Science* 96:153-156.
- TISDALE, S.; NELSON, W. 1975. *Soil fertility and fertilizers*. MacMillian. 694 p.
- VAN WAMBEKE, A. 1992. *Soils of the tropics; properties and appraisal*. McGraw Hill Inc. 343 p.
- VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. 1948. Soil density and root penetration. *Soil Science* 65:487-493.
- WESSELING, J.; VAN WIJK, W.R. 1957. Soil physical conditions in relation to drain depth. In *Drainage of agricultural lands*. Ed. by J. Luthin. Madison, Wis., American Society of Agronomy. p. 461-472.
- WILDING, L.P. 1994. Factors of soil formation: contributions to pedology. In *Factors of soil formation: A fiftieth anniversary retrospective*. Ed. by Luxmore et al. Madison, Wis., SSSA Special Publication No.33. Soil Science Society of America. p. 15-30.
- XU, X.; NIEBER, J.L.; GUPTA, S.C. 1992. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. *Soil Science Society of America Journal* 56:1743-1750.
- YAKUWA, R. 1946. *Über die Bodentemperaturen in verschiedenen Bodenarten in Hokkaido*. *Geophysical Magazine*, Tokyo 14:1-12 .