
Relación entre la física y la fertilidad de los suelos

Relationship between soil physics and soil fertility

Eduardo Casanova O. y Deyanira Lobo L.

Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Edafología, Maracay. AP 4579, Aragua, Venezuela. E-Mail: casanovaen@cantv.net; lobod@agr.ucv.ve

RESUMEN

Las prácticas de manejo de suelos que aplica el productor agrícola afectan directamente sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Ellas tienen el objetivo de mejorar el ambiente para el crecimiento de las plantas y sostener o aumentar la producción de manera viable y económica. Desde el punto de vista de la física de suelos hay propiedades estáticas que no cambian en el período de crecimiento del cultivo o inclusive por varios años (ejemplos: textura o densidad de las partículas). Por otro lado, hay propiedades físicas que son dinámicas y sus valores pueden cambiar afectados por un factor externo (ejemplos: densidad aparente, porosidad, contenido de humedad).

Hay procesos en el suelo como la compactación que produce cambios en propiedades del suelo como la densidad aparente y el espacio poroso lleno con aire y ello conduce a cambios en el desarrollo de las raíces y se limita la absorción de elementos nutritivos con una consecuente disminución en la productividad.

ABSTRACT

The soil management practices applied by the farmer to the soil affect directly its physical, chemical and biological properties. They have the goal of improving the soil environment for plant growth and to sustain or increase agriculture production in a viable and economic way. From the point of view of soil physical properties, there are static properties which do not change during a growing season, or even for many years (i.e. soil texture, particle density), and there are dynamic properties which can be changed by external forces (i.e. bulk density, air-filled porosity, soil water content).

There are processes in the soil, like soil compaction, which could cause changes in one or more soil properties like bulk density and air-filled porosity, that will reduce plant root growth, and so nutrient uptake and crop productivity.

This paper presents the interaction between soil physical properties and other soil properties related to soil fertility and fertilizers recently defined as Physical Soil Fertility which will allow to apply soil management practices.

Este trabajo presenta las interacciones entre algunas propiedades físicas del suelo con propiedades asociadas a la fertilidad del suelo y al uso de fertilizantes más recientemente definida como *fertilidad física* necesaria para definir las prácticas de manejo que deben ser usadas en un proceso agrícola.

Key words: compacted soil, tillage, fertilizers, liming, crops, yields, environment.

Palabras claves: compactación, labranza, fertilizantes, encalado, cultivos, rendimientos, ambiente.

INTRODUCCIÓN

El concepto de fertilidad física es relativamente reciente y Casanova (2005a) la ha definido como “aquellos factores que constituyen barreras físicas que impiden el crecimiento superficial o en profundidad del sistema radical. La compactación es uno de los más importantes por su efecto sobre la disminución de la penetración de las raíces y un menor aprovechamiento de la humedad y nutrientes y menor aireación o disponibilidad de oxígeno. Un suelo compacto ha perdido su estructura, disminuye su capacidad de infiltración, la relación fracción mineral-aire-agua no es la más apropiada y todo ello se traduce en menor explotación del suelo por las raíces y en consecuencia una menor capacidad de absorber nutrientes del suelo”.

Interacciones de Física y Fertilidad de Suelos para un mejor Manejo de las Prácticas Agrícolas.

a) *El Proceso de Compactación*

Un suelo ideal desde el punto de vista de su composición volumétrica tendría 50 % de fracción sólida y 50 % de fracción porosa. La fracción sólida estaría constituida por 45 % de la fracción mineral y 5 % de fracción orgánica y la fracción porosa estaría representada por poros grandes (25 %) responsables de la aireación y poros pequeños responsables de la retención de la humedad (25 %) (Figura 1).

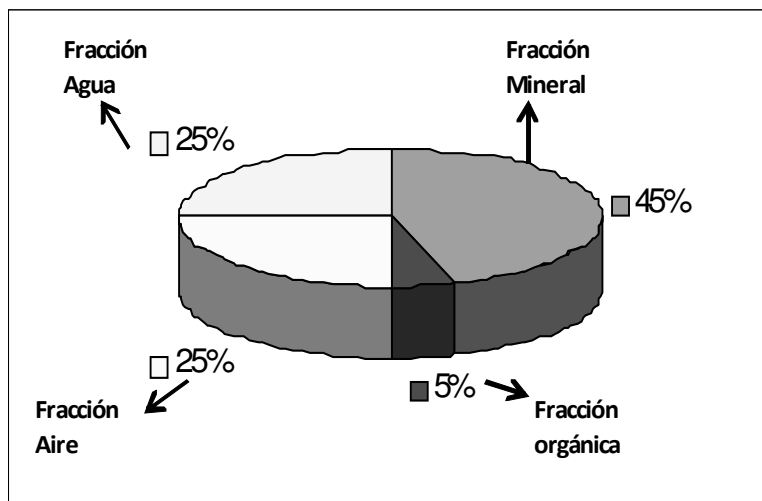


Figura 1. Los componentes en volumen en un suelo ideal para el crecimiento de las plantas.

Sin embargo, por prácticas de manejo inadecuadas, por ejemplo labranza convencional por muchos años, los cuatro componentes sufren variación en sus valores pasando a ser un suelo compacto y en consecuencia con efectos negativos sobre la producción vegetal (Figura 2).

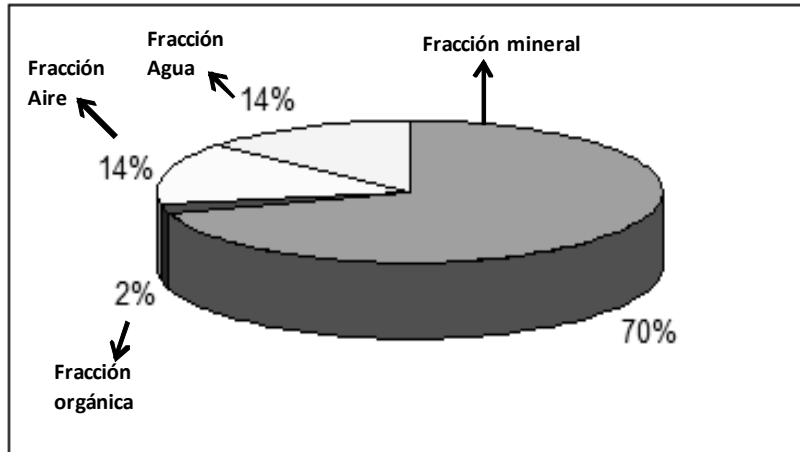


Figura 2. Los componentes en volumen en un suelo inadecuado para el crecimiento de las plantas.

Uno de los primeros efectos de la compactación del suelo es la disminución del crecimiento de las raíces (Figura 3) generándose una barrera física para la penetración en el suelo y en consecuencia las raíces se concentran de manera horizontal en los primeros centímetros de suelo con muy poca exploración del volumen de suelo.

(a)



(b)



Figura 3. Efecto de la compactación de suelos en el estado Cojedes Venezuela (a) y el crecimiento de raíces de tabaco en sentido horizontal muy cerca de la superficie del suelo (b).

El sistema radical de las plantas puede responder de diferentes maneras a las limitaciones del suelo; por ejemplo, puede reducir el tamaño de las raíces, detención de la penetración y menor profundización. Esto es debido, principalmente, a la impedancia mecánica excesiva y la aireación insuficiente que dependen de la humedad del suelo. Cuando se reduce el tamaño de las raíces se produce una mayor distancia entre ellas, lo cual afecta la toma de agua y nutrimentos (Glinski y Lipiec, 1990).

El poco crecimiento de las raíces debido al efecto de la compactación produce menor absorción de elementos nutritivos y por ello menor productividad. El cuadro 1 presenta información sobre un suelo compacto con una densidad aparente de $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$, y el mismo suelo al cual se le aplicó subsolado para descompactarlo con densidad aparente de $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$, en Turén, estado Portuguesa, Venezuela (Casanova, 2003), con el cultivo del maíz y su nutrición con fósforo (P) y rendimientos. Se observa que en el suelo compacto la concentración de P en hojas (0,12 %) en el momento más crítico de floración está por debajo de los valores considerados normales (0,20 %, Casanova, 2005a) y en consecuencia su productividad es muy baja (2.500 kg/ha). Al subsolar se elimina la capa compacta, las raíces exploran un mayor volumen de suelo y la nutrición foliar con P (0,31 %) supera el de los valores críticos y la productividad aumenta a 4.100 kg ha^{-1} , lo cual es una producción rentable para la zona.

Cuadro 1. Contenido de P en las hojas y productividad del cultivo del maíz en suelo compacto y no compacto en Turén, estado Portuguesa, Venezuela. (Fuente: Casanova, 2003).

SUELO	Densidad Aparente (Mg m^{-3})	% P en hojas al 75 % de producción de barbas del maíz	Productividad (kg ha^{-1})
Capa Compacta a 30 cm de profundidad	1,7	0,12	2,500
Subsolado, no compacto	1,3	0,31	4,100

La caña de azúcar es un cultivo permanente que se cosecha anualmente pero que los retoños (soca) se pueden manejar por 10 a 12 años y su labranza en cada soca generalmente se hace en una operación que incluye subsolado y fertilización (Figura 4).

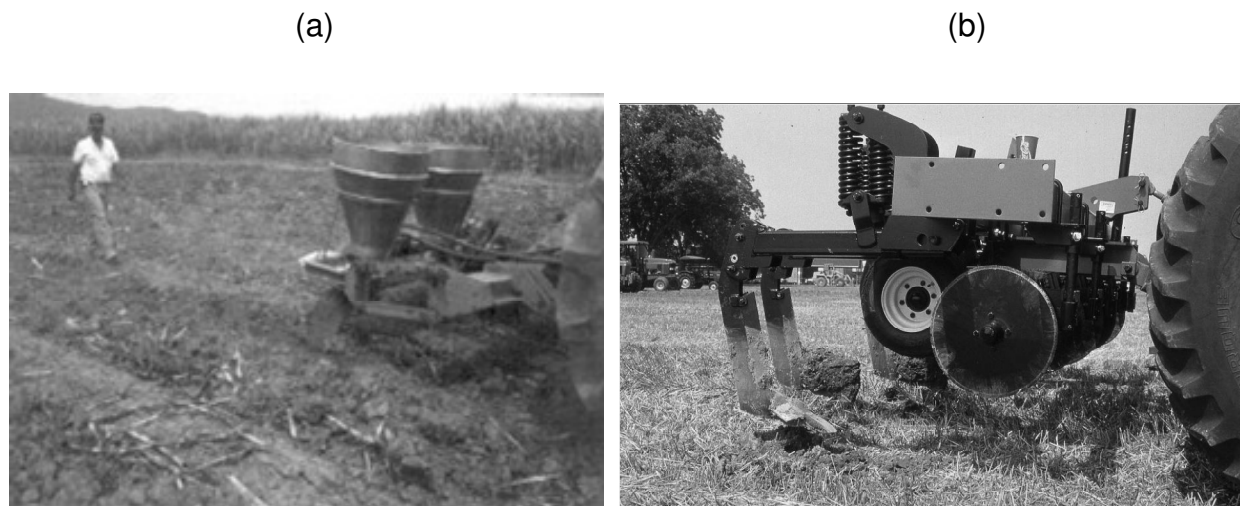


Figura 4. Subsólado y fertilización de soca de caña de azúcar en Las Velas, estado Portuguesa, Venezuela (a) y equipo subsolador usado para romper las capas compactas de los suelos (b). (Fuente: Casanova, 2005b).

La diferencia entre la nutrición y productividad de la caña de azúcar entre el suelo subsolado (sin compactación) y el compacto se observa en el cuadro 2 (Casanova, 2005b). El contenido de N, P y K en la cuarta hoja totalmente desarrollada tomada hasta los 4 meses de edad varió de 1,8 -2,6 % de N, 0,13 – 0,26 % P, 2,0 – 3,1 % K, para el suelo compacto y no compacto, respectivamente. Los valores de N y P en planta en el suelo compacto estuvieron por debajo del nivel crítico de 2 % para N y 0,15 % para P, valores referidos por Anderson y Bowen (1994), Zérega (1995) y Casanova 2005a. En el caso del K ambos valores estuvieron por encima del nivel crítico de 1 %, sin embargo, el suelo no compacto tuvo una mejor nutrición en este elemento. Las diferencias nutricionales entre la caña de azúcar que creció con limitaciones de suelo compacto y aquella que creció en suelo no compacto se reflejaron en los rendimientos en tallos de caña con 63 y 99 TM ha⁻¹, respectivamente. Un incremento de 33 TM/ha lo cual representa mayor rentabilidad para el productor.

Cuadro 2. Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio y productividad de la caña de azúcar en La Vela, estado Portuguesa, Venezuela. (Fuente: Casanova, 2005b).

Suelo	% N Foliar	% P Foliar	% K Foliar	TM ha ⁻¹ caña
	NC*: 2 %	NC: 0,15 %	NC: 1 %	
Compacto a 27 cm de profundidad	1,8	0,13	2	63
Suelo Subsolado no compacto	2,6	0,26	3,1	99

* NC: nivel crítico

El índice estructural asociado a la definición de suelos compactos es la densidad aparente la cual aumenta con la compactación. Cassel (2006) ha resumido los problemas que ocurren con los suelos compactos y algunas propiedades físicas de los suelos (Figura 5) y que ha sido modificada por Casanova (2007).

Tal como se observó en la Figura 2, un aumento de la densidad aparente (suelo compacto) aumenta el % en volumen de la fracción mineral y disminuyen las fracciones orgánica, aire y agua. La Figura 5 presenta la información de manera más gráfica en la cual se puede observar que con el aumento de la densidad aparente del suelo:

- ✓ disminuye la porosidad total
- ✓ aumenta ligeramente el contenido de humedad en el punto de marchitez permanente
- ✓ la capacidad de campo aumenta hasta valores de densidad aparente de 1,45 Mg m⁻³ y luego disminuye
- ✓ el agua aprovechable estaría representada por el área entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente
- ✓ los poros llenos con aire disminuyen lo cual hace reducir el área de la cantidad de agua aprovechable
- ✓ la resistencia del suelo al penetrómetro aumenta con la densidad aparente lo cual hace reducir aún más el área de la cantidad de agua aprovechable.

Bajo estas consideraciones observadas en las figuras 2 y 5, el contenido de agua aprovechable en suelos no compactos es mayor que en suelos compactos y en consecuencia los nutrimentos tendrán una mejor posibilidad de ser absorbidos por las plantas y generar una mayor productividad, tal como se observó en los cuadros 1 y 2 para los cultivos de maíz y caña de azúcar, respectivamente.

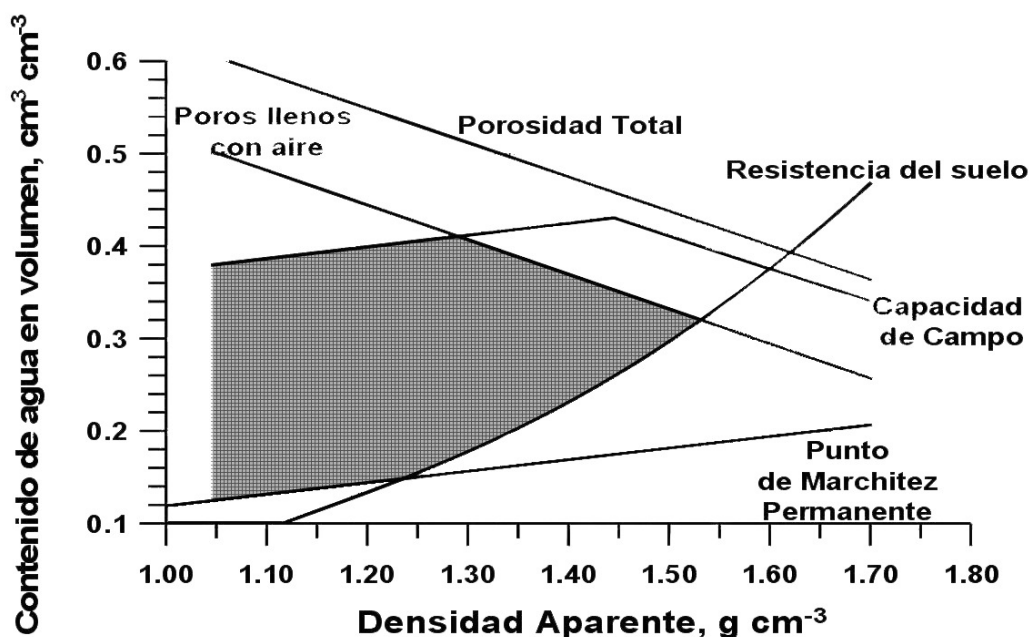


Figura 5. Relación entre la densidad aparente de los suelos y su contenido volumétrico de humedad y su efecto sobre otras propiedades físicas. (Fuente: Cassel, 2006 con modificaciones de los autores).

b) La Textura y su relación con criterios de fertilidad y aplicación de fertilizantes y enmiendas.

La textura del suelo es su proporción de arena, limo y arcilla y generalmente es una propiedad física estática, es decir, no cambia durante el período de crecimiento del cultivo o inclusive por varios años. De los componentes de la textura, la arena y el limo son importantes para darle sostén a las plantas y con algunas propiedades como la infiltración del agua en el perfil del suelo, mientras que la arcilla es muy dinámica desde el punto de vista químico, particularmente en el proceso de intercambio de cationes, el cual ha sido considerado como el más importante en el suelo comparándolo con la fotosíntesis en la planta.

La fertilización nitrogenada del maíz y el sorgo en Venezuela tradicionalmente se ha realizado aplicando 1/3 del total de N al momento de la siembra y los 2/3 restantes a aproximadamente a los 25-30 días después de la emergencia. Esto ha sido asociado a los requerimientos de ese nutriente por las plantas que en los primeros días es bajo pero luego aumenta linealmente hacia la madurez fisiológica del cultivo. Sin embargo, Solórzano (1986) y Casanova y Solórzano (1990) han realizado investigaciones usando al sorgo como cultivo indicador para evaluar si variando la textura desde suelos arenosos hasta suelos arcillosos, la recomendación de la fertilización con N se justifica de la manera tradicional.

En el caso de los suelos de texturas con predominio de la fracción arena, como ocurre en la mayoría de los suelos de las sabanas orientales de Venezuela, es de esperarse que las pérdidas de N por lavado sean relativamente altas y, por lo tanto, se estima que es necesario aplicar ese nutriente en forma fraccionada de la manera tradicional. Sin embargo, una gran cantidad del sorgo que se produce en Venezuela, se siembra en suelos de texturas medias a pesadas, donde las pérdidas de N por lavado se espera que sean insignificantes.

Para estudiar esa hipótesis, se realizaron investigaciones en Chaguaramas, estado Guárico, Venezuela, evaluando el comportamiento de las plantas y su estado nutricional a través del ciclo del cultivo, comparando el abonamiento tradicional con la aplicación de todo el N al momento de la siembra incorporándolo al suelo. En ambos casos se aplicaron 300 kg ha^{-1} de la fórmula 12-24-12 más 100 kg ha^{-1} de urea para un total de 82 kg ha^{-1} de N. Los resultados se observan en las figuras 6 y el cuadro 3.

En la Figura 6 se observa la producción de materia seca (hojas, tallos, flores, frutos) a través del ciclo del cultivo y lo más relevante fue que, aplicando todo el abono presiembra e incorporado al suelo, las plantas tuvieron un desarrollo muy superior a las plantas abonadas por el método tradicional, alcanzando al final del ciclo prácticamente la misma producción de materia seca. La figura 6 presenta esa situación, asignando valores relativos de la acumulación de materia seca y considerando al sistema tradicional como 100 %. El desarrollo inicial de las plantas es mejor con la aplicación de todo el abono presiembra e incorporado al suelo.

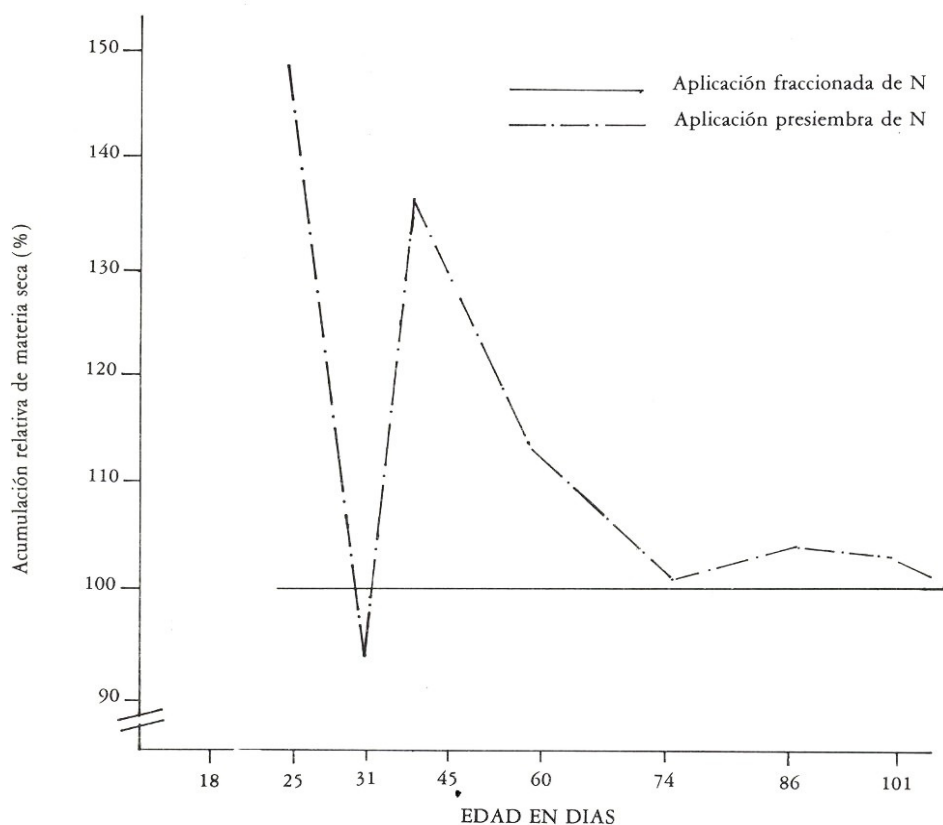


Figura 6. Acumulación de materia seca relativa del sorgo en Chaguaramas estado Guárico cuando se compara la fertilización nitrogenada fraccionada (considerada 100 %) con la aplicación total antes de la siembra en suelos de textura medias a pesadas (Fuente: Solórzano, 1986).

El cuadro 3 presenta la acumulación relativa de N por el sorgo comparando ambos métodos de aplicación. Esta variable se evaluó por medio de análisis de tejido en muestras tomadas a lo largo del ciclo de la planta. Las plantas donde todo el abono se aplicó presiembra incorporado al suelo, superan la acumulación de N bajo el método tradicional hasta los 60 días de edad. Esto se debe a que estas plantas desarrollan rápidamente un abundante sistema radical por la buena cantidad de nutrientes disponibles desde la siembra, lo cual permite explorar un mayor volumen de suelo y mayores posibilidades de absorción de agua y nutrientes.

Los resultados presentados en la figura 6 y el cuadro 3, señalan que la práctica del fraccionamiento del N en suelos de textura media a pesadas no rinde ningún beneficio adicional, sino que más bien pueden representar un aumento en los costos de producción.

La textura también es tomada en consideración cuando se realizan el diagnóstico y recomendación de enmiendas como el caso del encalado y la aplicación de yeso.

Con respecto al encalado, en los suelos de texturas más arenosas las cantidades oscilan de 300 a 1.000 kg ha⁻¹, en función del pH del suelo (Cuadro 4).

Cuadro 3. Acumulación relativa de N por el sorgo granífero cuando todo el N se aplicó presiembra, considerando 100 % los valores obtenidos con la aplicación tradicional fraccionada del N. (Fuente: Solórzano, 1986)

Edad en días de las plantas	Acumulación relativa de N Forma de aplicación del N	
	Fraccionada	Todo a Presiembra
18	100	151
25	100	96
31	100	135
45	100	97
60	100	104
74	100	95
86	100	79

Cuadro 4. Sistema de recomendación de encalado en suelos de texturas gruesas (Fuente: Rojas y Adams, 1980).

	pH del suelo		
Textura del suelo	< 4,5	4,5 – 5,0	5,0 – 5,4
Suelos de textura gruesa (kg ha ⁻¹)	1000	500	300

Por otro lado, para suelos con texturas medias a finas toman en consideración el pH del suelo, el contenido de calcio disponible y la textura como se observa en el cuadro 5.

Cuadro 5. Recomendación de carbonato de calcio para suelos de texturas medias a finas en Venezuela. (Fuente: Rojas y Adams, 1980).

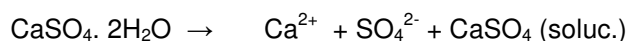
Textura del suelo	pH del suelo						
	< 4,5		4,5 – 5,0		5,0 – 5,4		
	Contenido de Calcio en el suelo						
	bajo	medio	alto	bajo	medio	alto	
Media (kg ha ⁻¹)	2.500	1.500	500	0	1.000	330	0
Fina (kg ha ⁻¹)	4.500	3.000	1.000	0	1.250	830	0

Las dosis de aplicación de encalado varían entre 330 y 4.500 kg ha⁻¹ que son más altas que las del cuadro 4 debido a que con el aumento de la fracción arcilla aumentan los sitios de intercambio catiónico y en consecuencia se requerirá más cal agrícola para neutralizar los iones H⁺ y Al⁺³ tanto en la solución del suelo como los que se desplazan desde los sitios de intercambio.

Para el caso del yeso o sulfato de calcio y tal como se ha reportado para Latinoamérica por INPOFOS (1999), los principales usos en agricultura se reportan en suelos ácidos y alcalinos. En Venezuela, el producto se ha comercializado para usos agrícolas después de un ligero tratamiento de eliminación de humedad y granulación y más recientemente enriquecido con nitrógeno y fósforo.

Para suelos con problemas de acidez en el subsuelo el encalado no es la respuesta práctica. Se ha reportado que toma de 10 a 14 años de encalado superficial para aumentar el pH del suelo hasta una profundidad de 15 cm. Por consiguiente, el encalado no solo no es suficiente para resolver el problema de acidez del subsuelo sino que falla en suplir calcio en horizontes profundos para corregir los problemas de infertilidad. La razón más importante es que la cal se mueve muy poco en el suelo debido a que el ión CO₃²⁻ se disipa como CO₂ después de las reacciones de hidrólisis y por ello su efecto benéfico ocurre sólo en la zona de aplicación. Para que la cal sea efectiva es necesario mezclarla con los primeros 15 a 20 cm de suelo.

En Venezuela existen alrededor de 70 millones de ha de suelos ácidos en donde es posible realizar aplicación de yeso, el cual se disuelve de acuerdo a la siguiente reacción:



De acuerdo a la reacción el yeso se disocia en Ca⁺² y SO₄⁻² como iones en la solución del suelo que pueden moverse hacia capas de suelo más profundas. De esta manera el Ca⁺² puede reemplazar cationes en la fase de intercambio y liberar a la solución del suelo Al⁺³, Mg⁺², K⁺, los cuales pasan a formar pares iónicos con el sulfato generando el incremento de cationes como Mg y K en capas más profundas y la eliminación de Al₂(SO₄)₃ que no es tóxico. Esto conlleva a una mejor formación radical, mayor crecimiento y rendimiento de los cultivos.

Para los suelos alcalinos el efecto del yeso es medido por los cambios en la conductividad hidráulica, por la germinación de la semilla y por el rendimiento de los cultivos. La recuperación de suelos salinos y sódicos incluye la conversión de arcillas con Na a arcillas con Ca generando una mejor agregación del suelo.

Las dosis a aplicar de yeso se pueden estimar a través del uso de la fórmula:

$$\text{Yeso (t ha}^{-1}\text{)} = (0,4 \times \text{CICE} - \text{Ca cmol kg}^{-1}) \times 2,5$$

Donde CICE es la capacidad de intercambio de cationes efectiva y Ca el calcio intercambiable. Si no se dispone de esa información se ha propuesto el cuadro 6 para la aplicación de yeso en función de la textura del suelo.

Cuadro 6. Estimación de la dosis de yeso a aplicar en función de la textura de los suelos

Textura del Suelo	Dosis de Yeso a aplicar (t ha⁻¹)
suelos arenosos (< 15 % arcilla)	0,5
suelos francos (15-35 % arcilla)	1,0
suelos arcillosos (35-60% arcilla)	1,5
suelos muy arcillosos (> 60 % arcilla)	2,0

La textura también es un criterio de diagnóstico para calificar el contenido de materia orgánica (Cuadro 7). De esta manera si en el análisis de rutina de un suelo el contenido de materia orgánica resulta 3,1 % su calificación será alta si la textura es gruesa y será medio si las texturas son medias y finas.

Cuadro 7. Calificación de la materia orgánica en los suelos en función de la textura (Fuente: INIA, 2005).

Grupo Textural	% Materia Orgánica		
	BAJO	MEDIO	ALTO
GRUESAS	< 1,5	1,5 - 3	> 3
MEDIAS	< 2	2 - 4	> 4
FINAS	< 3	3 - 5	> 5

Texturas Gruesas: a, aF y Fa; Texturas Medias: FAa, F, FL, FA, Aa, y L; Texturas Finas: A, AL, FAL

c) Los sistemas de labranza, la distribución de los nutrimentos en profundidad y la productividad de los cultivos.

Un factor importante asociado a la Física de Suelos es la labranza y hoy en día se discuten y comparan la labranza convencional (varios pases de arado y rastra a 20 cm de profundidad) con la mínima labranza con la cual se disturban los primeros 7 cm de la superficie del suelo. El uso de la labranza convencional sobre el mismo suelo cada año, contribuye a la pérdida de la estructura y a la compactación, lo cual afecta el crecimiento de las raíces de los cultivos. A la mínima labranza se le atribuyen muchas ventajas sobre todo en las propiedades físicas del suelo como conservación de la estructura del suelo, disminución de la pérdida de humedad por evaporación, ya que se conservan los residuos vegetales de cultivos anteriores sobre la superficie del suelo y disminuyen los riesgos de erosión. Todas esas ventajas deben reflejarse en mejores rendimientos siempre y cuando otros factores del sistema suelo-planta-clima estén bajo condiciones óptimas. Casanova (2005b) estudió la distribución del fósforo y potasio en el perfil del suelo bajo estos dos sistemas de labranza y su efecto sobre los rendimientos del maíz y encontró que la mínima labranza produce rendimientos inferiores en suelos cuando se presenta déficit de humedad (Figura 7).

La mayor cantidad de fósforo (P) aprovechable en la labranza mínima se concentra en los primeros centímetros de suelo y disminuye drásticamente con la profundidad, mientras que la labranza convencional tiene una menor concentración de P aprovechable en la superficie, pero su distribución en el perfil de suelo es más uniforme. Cuando se produce déficit de humedad el suelo comienza a secarse desde la superficie hacia abajo en el perfil, por lo que en la labranza mínima todo el P concentrado en la superficie no se hace aprovechable por la falta de humedad y los rendimientos disminuyen. Sin embargo, en la labranza convencional, por tener una distribución más uniforme del P al presentarse el déficit de humedad, las raíces todavía pueden aprovechar el P disponible a 18 cm de profundidad, donde aún existe humedad, reflejándose en mejores rendimientos.

Cuando las condiciones de humedad son óptimas la labranza mínima generalmente produce mayores rendimientos que la labranza convencional.

d) La estructura del suelo y la disponibilidad de micronutrimentos.

El contenido de microelementos y su distribución en el perfil están influenciados por los efectos del uso y manejo sobre la estructura del suelo. Con el propósito de evaluar el contenido de microelementos y su distribución en macroagregados y microagregados y su relación con otras características del suelo en el perfil. Peña et al. (2008) llevaron a cabo un ensayo en un Entisol arenoso, clasificado como Quartzipsament, ubicado en la Estación Experimental La Iguana, en el estado Guárico, en un sistema de producción maíz-ganado mejorado. El maíz fue sembrado usando siembra directa sobre diferentes tipos de coberturas: Vegetación Natural (VN), Centrosema macrocarpum (Cm), Urochloa dictioneura (Udy) y Urochloa decumbens (Ude), las cuales se utilizaron para pastoreo del ganado ovino, después de la cosecha del maíz

Los resultados que se presentan en el cuadro 7 permiten mostrar una disminución del contenido de materia orgánica y de la capacidad de intercambio catiónico, tanto en macroagregados como en microagregados, con la profundidad,; mientras que la arcilla tuvo ligeros incrementos con la profundidad. La variación en el contenido de los microelementos bajo las diferentes coberturas, puede estar asociado a las

diferencias en los aportes de las mismas al suelo y las diferencias a la extracción de microelementos por parte de ellas. Con relación a la mayor cantidad de micronutrientes en los microagregados se debe a la capacidad de intercambio catiónico, asociada ésta más al mayor contenido de materia orgánica que a las arcillas presente. De todos los tratamientos de coberturas, el suelo bajo VN presentó la menor disponibilidad de Fe y Cu, mientras que la mayor disponibilidad de estos microelementos se produjo en el suelo bajo Ude. El suelo bajo Ude presentó los menores contenidos de Zn y Mn y los mayores contenidos de estos microelementos se encontraron en el suelo bajo el tratamiento Udy.

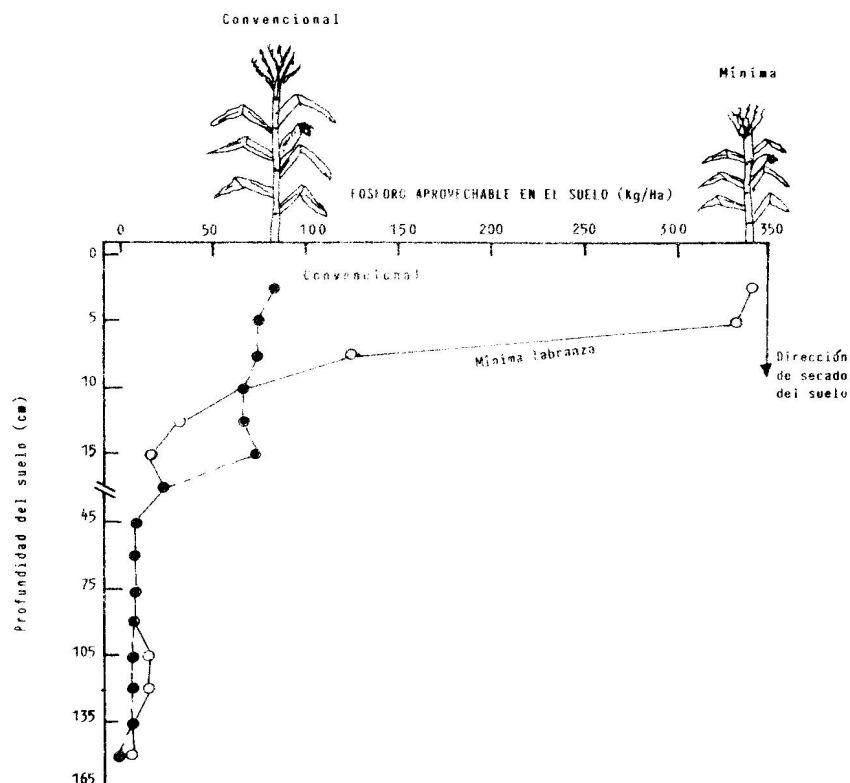


Figura 7. Relación entre la distribución de fósforo en el perfil de suelo y los rendimientos de maíz en sistemas de labranza convencional y mínima cuando se presenta déficit de humedad (Casanova, 2005b).

e) El manejo de la preparación del suelo y las pérdidas de nutrientes

En Venezuela desde los años ochenta se han realizado evaluaciones para medir la cantidad de suelo que se pierde en el agua de escorrentía y en sedimentos erosionados, sin embargo, hay muy poca información en la cuantificación química y calidad de la pérdida de suelos en procesos de erosión. Casanova et al. (1989) evaluaron la pérdida de nutrientes en sedimentos erosionados bajo diferentes manejos, en un suelo Cumulic Haplustoll, localizado en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central en Venezuela. Al final de cada parcela se colocaron colectores para recibir el material erosionado y cuantificar la pérdida de nutrientes. El Cuadro 8 presenta los resultados de alguno de los tratamientos establecidos.

Los resultados muestran que al dejar al suelo desnudo sometido a un tratamiento con labranza convencional queda expuesto a ser alterado por el impacto de la lluvia en varias propiedades físicas, entre ellas la estructura y la retención de humedad, produciendo la mayor pérdida de nutrientes. En la medida que se produce cobertura vegetal disminuye la pérdida de nutrientes en el siguiente orden: maíz > cultivos asociados > rotación > bosque. El trabajo destaca la importancia de conservar la superficie de los suelos de manera que sus propiedades físicas se alteren lo menos posible y producir menos erosión y en consecuencia menor pérdida de nutrientes, particularmente del primer horizonte del suelo donde está su mayor capacidad productiva.

Cuadro 7. Algunas características químicas y contenido de micronutrientes en diferentes tamaños de agregados (Fuente: Peña et al, 2008)

Tratamiento	Agregados	Prof. (cm)	Fe	Cu	Zn	Mn	pH	Carbono Orgánico	CIC ¹
			mg kg ⁻¹					(%)	(cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)
Vegetación Natural VN	Micros	0-5	18,32	0,33	2,17	28,32	4,50	0,89	1,81
		5-15	26,45	0,47	1,61	17,79	4,74	0,58	1,13
		15-30	25,31	0,57	0,67	4,70	4,62	0,28	0,53
	Macros	0-5	12,57	0,21	1,35	17,91	4,50	0,50	1,22
		5-15	16,81	0,32	1,21	10,72	4,74	0,33	0,70
		15-30	16,42	0,36	0,25	2,87	4,62	0,19	0,32
<i>Centrosema Macrocarpum Cm</i>	Micros	0-5	38,97	0,38	1,39	14,20	4,84	0,64	1,51
		5-15	45,74	0,45	0,72	7,74	4,46	0,46	0,89
		15-30	49,57	0,50	0,52	3,46	4,49	0,47	0,57
	Macros	0-5	29,08	0,24	1,07	10,16	4,84	0,35	1,10
		5-15	30,08	0,33	0,57	4,71	4,46	0,28	0,64
		15-30	35,29	0,38	0,34	2,31	4,49	0,27	0,35
<i>Urochloa dyctioneura Udy</i>	Micros	0-5	17,90	0,53	1,69	22,34	5,17	0,55	1,54
		05-15	20,53	0,63	1,45	16,56	4,89	0,35	0,92
		15-30	18,83	0,68	1,36	9,84	4,82	0,45	1,10
	Macros	0-5	14,24	0,40	1,42	17,54	5,17	0,33	1,30
		5-15	14,45	0,48	1,05	11,32	4,89	0,24	0,65
		15-30	13,54	0,51	0,89	6,96	4,82	0,27	0,79
<i>Urochloa decumbens Ude</i>	Micros	0-5	40,94	0,62	1,34	12,52	4,29	0,52	1,36
		05-15	54,50	0,80	0,70	6,09	4,46	0,38	0,75
		15-30	55,69	1,07	0,47	2,50	4,46	0,36	0,46
	Macro	0-5	29,62	0,45	0,97	8,99	4,29	0,25	1,00
		5-15	41,63	0,61	0,54	4,26	4,46	0,29	0,56
		15-30	43,22	0,81	0,33	1,74	4,46	0,25	0,33

¹Capacidad de Intercambio Catiónico**f) El impacto sobre la productividad**

Asumiendo que, bajo determinadas condiciones de clima y manejo, el rendimiento de un determinado cultivo indicador depende de las condiciones del suelo que propician un ambiente edáfico adecuado para el buen desarrollo radical del mismo, Lobo et al., (2005), utilizaron el Índice de Productividad (IP) desarrollado por Pierce et al., (1983) y adaptado por Delgado (2003) para las condiciones de Venezuela para evaluar los efectos de la erosión hídrica sobre la productividad de suelos de Chaguaramas, estado Guárico, con diferentes niveles de erosión.

$$IP = \sum_{i=1}^n A_i * B_i * C_i * K_i$$

Donde: **A** representa las condiciones que regulan las relaciones agua: aire en cada horizonte *i*, y puede ser valorado con la capacidad de almacenamiento de agua o con la capacidad de aireación; **B** serían las condiciones que determinan la resistencia mecánica, pudiéndose evaluar mediante el grado de compactación medido con la densidad aparente o por el volumen de fragmentos gruesos; **C**: las condiciones que regulan la fertilidad potencial, valorado con el contenido de materia orgánica o el pH; y **K** evalúa la importancia relativa de cada horizonte *i* en el perfil del suelo.

Cuadro 8. Pérdida de nutrimentos (kg ha^{-1}) en materiales de suelos erosionados en el suelo Cumulic Haplustoll en Venezuela en relación con los tratamientos de manejo. (Fuente: Casanova et al., 1989).

Tratamiento	Materia Orgánica	N Total	P Aprovechable	Ca Intercambiable	Mg Intercambiable	K Intercambiable
Suelo desnudo [*]	6042	614	111	574	53	96
Maíz ^{**}	2042	192	16	212	14	25
Cultivos asociados ^{***}	50	49	7	48	4	6
Rotación ^{****}	71	7	0,3	10	0,40	0,7
Bosque ^{*****}	10	1	0,1	1,4	0,1	0,1

* Labranza convencional sin cultivo; ** Siembra de maíz con prácticas agronómicas tradicionales; *** Control de maleza y siembra de maíz y auyama en la parcela y bananos en el contorno; **** Siembra de una gramínea en el centro de la parcela y maíz en la parte superior e inferior; ***** Parcela con bosque natural.

Se seleccionaron cuatro localidades con el mismo tipo de suelo, con pendientes entre 3 y 6 % y con diferentes niveles de erosión: Chaguaramas I (ligeramente erosionado); Chaguaramas II y III (moderadamente erosionados, con 5 y 8 cm de suelo removido) y Chaguaramas IV (severamente erosionado, con 10 cm de suelo removido)

En el Cuadro 9 se muestran las propiedades del suelo y el Índice de Productividad (IP) calculado para cada horizonte y suelo. Los resultados indican que el mayor valor del IP lo presenta el suelo menos erosionado ($\text{IP}=0,55$), mientras que el suelo mas erosionado muestra el mas bajo valor del IP ($\text{PI}=0,27$). Puede notarse que el IP fue afectado principalmente por los cambios en la capacidad de almacenamiento de agua disponible, el cual estuvo en función del contenido de arcilla, y la densidad aparente; mientras que el pH no tuvo un marcado efecto, ya que los valores siempre estuvieron cercanos a 1.

g) El impacto ambiental

Los criterios de fertilidad física expresados anteriormente son fundamentales para un uso más eficiente de los nutrimentos y en consecuencia generar el menor impacto ambiental posible.

En Venezuela se siembran cada año o están establecidas aproximadamente 1 millón de hectáreas de cultivos anuales y 6 millones de cultivos permanentes, sobre los cuales se aplican unas 800.000 TM de fertilizantes. El reto para el productor en el manejo de su cultivo es usar los nutrimentos para las plantas de la forma más precisa posible de manera que pueda equiparar la aplicación de fertilizantes con las necesidades del cultivo, limitando su pérdida y produciendo cultivos de alta calidad, rentable y no contaminante (Casanova, 2007).

La baja eficiencia de uso de los fertilizantes por las plantas permite que los nutrimentos aplicados en el campo no sean absorbidos y en el tiempo ir a ambientes donde pueden causar contaminación. Esas pérdidas pueden ocurrir: 1. por escorrentía como resultado de la erosión causada por fuertes lluvias, 2. son lavados a través del suelo después del área de las raíces y eventualmente llegando al agua subterránea, 3. escapan a la atmósfera como gases volátiles; impactando a la salud humana, a la calidad del agua, a la atmósfera, a la flora y a la fauna.

Algunos ejemplos de esos impactos son la enfermedad de los niños azules y el cáncer gástrico ocasionado por el exceso de nitratos en el agua de consumo, la disminución de la capa de ozono y su efecto sobre cáncer de la piel, la eutrofización y crecimiento de algas y otras especies vegetales en los cuerpos de agua producido por los excesos de fósforo y potasio que drenan a los cuerpos de agua incluyendo el impacto de los detergentes.

Cuadro 9. Propiedades del suelo Chaguaramas e Índice de Productividad (Fuente: Lobo et al., 2005)

Suelo	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Sub-factor A	Densidad Aparente Mg m ⁻³	Sub-factor B	pH	Sub-factor C	Sub-factor K	IP*
Chaguaramas I	0 – 20	12,0	0,95	1,55	0,85	5,9	1,00	0,30	0,24
	20 – 38	17,0	0,90	1,63	0,60	6,2	1,00	0,18	0,10
	38 – 70	25,0	0,85	1,60	0,82	6,0	1,00	0,30	0,21
								Muy alto	0,55
Chaguaramas II	0 – 15	12,0	0,95	1,62	0,80	5,4	0,95	0,23	0,17
	15 – 35	19,5	0,85	1,68	0,50	5,9	1,00	0,22	0,09
	35 – 60	27,0	0,82	1,61	0,82	5,7	1,00	0,35	0,24
								Alto	0,50
Chaguaramas III	0 – 12	14,0	0,95	1,57	0,85	5,4	0,95	0,18	0,15
	12 – 32	20,5	0,85	1,70	0,45	5,0	0,85	0,22	0,08
	32 – 42	23,0	0,82	1,70	0,45	4,2	0,60	0,10	0,04
	42 – 70	37,0	0,75	1,60	0,82	4,8	0,80	0,30	0,18
								Alto	0,37
Chaguaramas IV	0 – 10	10,0	0,9	1,58	0,82	5,3	0,90	0,15	0,11
	10 – 18	14,0	0,87	1,63	0,64	5,1	0,88	0,10	0,06
	18 – 35	17,0	0,85	1,63	0,64	5,2	0,92	0,20	0,11
	35 – 45	24,0	0,75	1,75	0,20	5,8	1,00	0,10	0,02
	45 - 70	20,0	0,80	1,83	0,10	5,0	0,85	0,25	0,02
								Moderado	0,27

IP*: Índice de Productividad

Literatura citada

- Anderson, D. L.; J.E. Bowen.** 1994. Nutrición de la caña de azúcar. Potash and Phosphate Institute, Canada. 23 p.
- Casanova, E.** 2007. Impacto ambiental del uso de los fertilizantes. Seminario en el Postgrado de Ingeniería en la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela. 4 p.
- Casanova, E.** 2005a. Introducción a la Ciencia del Suelo. Segunda Edición. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 482 p.
- Casanova, E.** 2005b. Características físicas, químicas y biológicas de los suelos y su relación con la caña de azúcar. *Revista Técnica ATAVE, Asociación de Técnicos Azucareros de Venezuela*, 3 (2):11-19.
- Casanova, E.** 2003. Manejo de macronutrientes en la fertilización del maíz en Venezuela. En: X Curso sobre producción de maíz en Venezuela. ASOPORTUGUESA, INIA. p. 253-271.
- Casanova, E. y P. R. Solórzano.** 1990. Nitrogen, phosphorus and potassium uptake of two sorghum cultivars in an acid soil of Venezuela. In: M.L. van Beusichem (Ed.). *Plant and Soil*, Kluwer Academic Publishers. p. 591-594.
- Casanova, E.; M. L. Páez y O. Rodríguez.** 1989. Pérdida de nutrientes por erosión bajo diferentes manejos en dos suelos agrícolas. *Revista Facultad de Agronomía*. Alcance 37: 33-43.

- Cassel, K.** 2006. Applied soil physics for agricultural soil management. X Congreso Nacional y III Internacional de la Ciencia del Suelo. Universidad Agraria La Molina, Lima, Perú. Proceedings, p. 55-59.
- Delgado, F.,** 2003. Soil physical properties on Venezuelan steeplands: applications to conservation planning. College on Soil Physics. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. (11 p.)
- Gliski J. y J. Lipiec,** 1990. Soil physical conditions and plant roots. CRC Press, Boca Raton, Florida. 250 p.
- INPOFOS.** 1999. Acidez y encalado de los suelos. Primera Edición, Instituto de la Potasa y el Fósforo, Ecuador. 42 p.
- Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA).** 2005. Instructivo para la recomendación de fertilización en suelos y cultivos en Venezuela. Versión digital (CD).
- Lobo D.; Z. Lozano; F. Delgado.** 2005. Water erosion risk assessment and impact on productivity of a Venezuelan soil. *Catena* 64:297-306.
- Peña S., Y.; D. Lobo L.; Z. Lozano P. y R. M. Hernández H.** 2008. Micronutrients in different aggregate fractions of a savanna soil, under a maize-livestock production system. En: Proceedings of the 6th International Symposium Agro Environ "Natural Resources Conservation Use & Sustainability. Antalya, Turkey. p 423 – 428.
- Pierce, F.C.; W.E. Larson; R.H. Dowdy y W.A. Graham.** 1983. Productivity of soils: assessing long-term changes due to erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38:39-44.
- Rojas, I. y M. Adams.** 1980. Naturaleza de la acidez de los suelos representativos de Venezuela y su influencia en los requerimientos de cal. II. Comparación de caliza calcítica y dolomítica como materiales de enmienda. *Agronomía Tropical* 30 (1-6):241-268.
- Solórzano, P.** 1986. El sorgo granífero: su producción en Venezuela. Protinal, Valencia, Venezuela. 140 p.
- Zérega, L.** 1995. Manejo de suelos y uso de fertilizantes en el cultivo de la caña de azúcar. En: Revista Venezuela Azucarera, Asociación de Técnicos Azucareros, (53):26-38.