

Modelo de producción de biomasa en suelos ácidos de *raña* corregidos con productos calizos

Biomass production model for lime amended acid *raña*-soils

E. Villa¹ & M. Vidal¹

RESUMEN

Se han realizado unos ensayos de campo de dos años de duración encaminados a la corrección de la acidez de un Typic Palexerult, de las formaciones de *raña* de la meseta norte de la provincia de León (España). El cultivo ensayado fue una variedad local de centeno, empleándose como materiales calizos en la enmienda del suelo el yeso, dolomita, caliza y espumas de azucarería, con dosis de 6000 kg ha⁻¹ de CaCO₃ equivalente. Además de la analítica general, se determinaron las formas de Al solubles y fácilmente intercambiables (Al-CaCl₂), además del Al extraído con KCl y con BaCl₂. Los modelos de regresión lineal múltiple de la producción total de biomasa demuestran que durante el primer año son el Al-CaCl₂, pH y CICE los parámetros más explicativos de la varianza (R² = 0,82). Por el contrario, durante el segundo año de cultivo son el Al-KCl y el porcentaje de saturación de bases las variables más correlacionadas con la producción (R² = 0,80).

Palabras-clave: Al, biomasa, encalado, modelo, *rañas*.

ABSTRACT

Field trials were carried out over a period of two years, aimed at correcting the acidity of a Typic Palexerult in *raña* formations in the northern mesa of León province (Spain). Gypsum, dolomite, limestone and sugar foam waste were employed as liming materials to correct soil acidity, incorporating 6000 kg of CaCO₃ equivalent per ha⁻¹, and crop trials were carried out using a local variety of rye. In addition to carrying out a general analysis, soluble and easily exchanged forms of Al were identified (Al-CaCl₂), as was Al extracted using KCl and BaCl₂. Multiple linear regression models for total biomass production show that in the first year, variance (R² = 0.82) was largely explained by the parameters Al-CaCl₂, pH and CECE. However, in the second year of crop trials, production was most closely correlated with the variables Al-KCl and base saturation percentage (R² = 0.80).

Key-words: Al, biomass, liming, model, *rañas*.

¹ Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria, Universidad de León, 24071 León, España, e-mail: jevilb@unileon.es

INTRODUCCIÓN

Los Xerults son los Ultisols de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) que presentan un régimen de humedad xérico y se corresponden, entre otros, con los alúmicos Acrisols de la WRB (FAO, 1998). La experiencia con relación al uso y al manejo agrícola de los Ultisols bajo clima mediterráneo resulta más restringido que el que se tiene de los subórdenes Udults y Ustults, asociados a regiones con clima subtropical-más cálido y húmedo- y con una mayor distribución geográfica a nivel mundial (Soil Survey Staff, 1999). El grupo de los Palexerults se encuentran bien representados en el centro, oeste y norte de la península Ibérica (España y Portugal). Normalmente, se ubican sobre las antiguas superficies de *raña*. Este último término se aplica a las formas de relieve caracterizadas por una pendiente ligera y presentar una cobertura detrítica continental, así como por estar asociadas a las alineaciones cuarcíticas de las sierras próximas, datando su formación durante el Plioceno medio superior (Espejo, 1987).

Las desventajas agronómicas de este tipo de suelos se centran, fundamentalmente, en dos aspectos. Por una parte, la presencia de horizontes argílicos caracterizados por una intensa alteración mineral, alto contenido de Al de cambio y, como consecuencia de lo anterior, con un escaso contenido de elementos esenciales tales como el Ca, Mg, Cu, Zn y P. A medida que aumenta la profundidad del horizonte en el perfil del suelo el pH decrece y se incrementa, simultáneamente, el contenido de Al^{+3} fitotóxico, muy especialmente en los horizontes Bt subyacentes (Boul *et al.*, 1994). El segundo factor limitante que presenta el suborden de los Xerults en relación con el de los Udults se deriva de su régimen de humedad xérico, tan propio del área mediterránea. Este aspecto condiciona la disponibilidad de

agua durante la fase de crecimiento y desarrollo de la vegetación, sometida durante el periodo estival a un intenso estrés hídrico.

Ambos factores condicionantes, la acidez extrema y las prolongadas condiciones de sequedad que padece la sección de control del suelo, sugieren que el buen manejo de los Palexerults vaya dirigido en un doble aspecto: por una parte, la disminución del Al^{+3} fitotóxico y, por otra, el crecimiento y la expansión del volumen de rizosfera, particularmente la que se encuentra asociada a los horizontes AB y Bt. La naturaleza eminentemente arcillosa del horizonte argílico es un factor positivo en orden a incrementar potencialmente la reserva de agua del suelo asociada con la zona radicular (Ritchey *et al.*, 1995).

En general, la escasa solubilidad de los materiales calizos utilizados en la práctica agronómica del encalado (caliza y dolomita) dificulta la reducción eficaz de la toxicidad generada por el Al^{+3} en los horizontes subsuperficiales del suelo (Reeve & Summer, 1970; 1972). Como alternativa a la falta de movilidad de aquellos materiales, se utiliza también el yeso o los residuos de azucarería (espumas) que resultan más solubles y, por tanto, más eficientes en la disminución del porcentaje de saturación de Al del horizonte Bt (Shaimberg *et al.*, 1989). En concreto, los efectos positivos que se atribuyen a la aplicación de yeso se relacionan con el aumento que experimenta la relación Ca/Al del suelo (Lund, 1970; Noble *et al.*, 1988; Kinraide *et al.*, 1992), así como por inducir la formación de pares iónicos del tipo $AlSO_4^+$ (Pavan *et al.*, 1982; Kinraide & Parker, 1987) y al propio efecto autoencalante descrito por Reeve and Summer (1970, 1972).

MATERIAL Y MÉTODOS

Los ensayos se realizaron en un Typic Pa-

lexerul de la *raña* de Camposagrado (N de León, España) y tuvieron una duración de dos años. El cultivo ensayado fue una variedad local de centeno. Los materiales calizos empleados en la corrección fueron caliza, yeso, dolomita y espumas de azucarería, aplicándose una dosis de cada uno de los productos que fuera equivalente a 6000 kg ha^{-1} de CaCO_3 y la incorporación al suelo se realizó mediante pase de rotavator. El análisis de la composición química de los cuatro productos correctores se llevó a cabo mediante espectrometría de absorción atómica, previa fusión alcalina y digestión con HF y HClO_4 (Jackson, 1976).

El diseño experimental consistió en el establecimiento de unos bloques al azar, con cuatro repeticiones por tratamiento además de las parcelas control.

Cada parcela tenía un tamaño de $3 \times 5 \text{ m}^2$, separadas por calles de 2 m.

En el abonado de fondo se aplicaron 12 kg N ha^{-1} , $22,5 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ y $22,5 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, procedentes de un abono complejo 8-15-15. En cobertera se aplicaron 38 kg N ha^{-1} en forma de NAC del 33%. Este abonado se corresponde con el que de forma tradicional hacen los agricultores de la zona.

Durante la primavera se realizó un control de la flora adventicia de hoja ancha con un tratamiento con MCPA al 40% y a una dosis de 1 l ha^{-1} .

La recolección se efectuó con una motosegadora, dejando en el terreno un rastrojo de 16 cm aproximadamente, recogiendo el resto de la parte aérea para ser pesada posteriormente en el laboratorio. Esta parte recogida y pesada, es la evaluada como producción total de biomasa de cada una de las parcelas.

El seguimiento de las experiencias se realizó mediante muestreos de los horizontes A y AB, subdividiendo a estos efectos el primero de ellos en dos profundidades: A1 (0-12 cm) y A2 (12-25 cm). Durante los dos años agrícolas se realizaron un total de cuatro muestreos: 2 en

el mes de marzo y con el cultivo de centeno implantado, y 2 durante la postcosecha (mes de octubre). El análisis de las muestras de suelo consistió en la determinación del pH en agua y en $\text{KCl } 1\text{M}$ (1:2.5), conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO) (Walkley & Black, 1934). El análisis textural del suelo de las parcelas se realizó mediante la técnica propuesta por Kilmer & Alexander (1949). Las bases de cambio se extrajeron con $\text{NH}_4\text{OAc } 1\text{M}$ a pH 7 y cuantificadas por absorción atómica (Ca y Mg) y emisión de llama (Na y K); la CIC se determinó valorando el NH_4^+ en un destilador automático Kjeldahl. El Al fue extraído con $\text{KCl } 1\text{M}$ (Lin & Coleman, 1960) y determinado por ICP. Finalmente, se analizaron las formas de Al solubles y fácilmente intercambiables y extraídas mediante $\text{CaCl}_2 \text{ } 0,01\text{M}$ (Al- CaCl_2) propuesto por Hoyt and Nyborg (1972), así como el Al (Al- BaCl_2) extraído con la solución de $\text{BaCl}_2 \text{ } 0,1\text{M}$ (Peech, 1947). A partir de los resultados anteriores se obtuvieron los parámetros de la CICE, porcentaje de saturación de bases y de Al (V-b% y V-Al%, respectivamente), así como la relación Ca/Al.

El análisis de los resultados permitió establecer los modelos empíricos de la producción de biomasa de centeno, aplicando los modelos estadísticos de regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados (OLS) y siguiendo el método de stepwise. El paquete estadístico utilizado fue el SPSS v.15.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presenta los resultados correspondientes al análisis químico de los materiales calizos utilizados en la enmienda del suelo. Cabe destacar cómo la dolomita es el producto de mayor contenido de Mg, mientras que la caliza y las espumas se muestran más enriquecidas en Ca. También resulta normal que la presencia de Al,

Tabla 1- Composición química de los materiales calizos. Los valores CaO, MgO, Na₂O, K₂O y MO están expresados en (g kg⁻¹); Al, Fe, Mn, Zn y Cu en (mg kg⁻¹)

	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al	Fe	Mn	Zn	Cu	MO
espuma	403,8	14,7	0,4	1,0	2469	1420	121	32	12	79,0
caliza	437,0	20,8	0,4	3,5	7869	5787	299	24	11	0,0
dolomita	311,0	184,0	1,2	3,5	9529	10483	361	26	12	0,0
yeso	331,6	17,5	0,7	1,5	3351	1826	41	16	4,6	0,0

derivada de los silicatos existentes en algunos de estos materiales, sea mayor en la caliza y en la dolomita. A diferencia de los otros productos, las espumas de azucarera tienen 79 g kg⁻¹ de materia orgánica, con una relación C/N=11,0.

De igual modo, la caracterización física y química de los tres primeros horizontes del suelo se exponen en las Tablas 2 y 3.

La diferencia entre el pH-KCl y el pH-H₂O supera ligeramente la unidad, lo que es indicador de la importante carga neta que presenta este suelo. Por otra parte, la relación entre los pH y los porcentajes de saturación de bases (V-b%) se corresponde estrechamente con los que exhibe la caolinita, que es la especie mineralógica dominante. Los contenidos de P asimilable ponen de manifiesto la pobreza natural que presenta el suelo y la necesidad de una corrección P-K. El Al resulta ser el catión dominante en el complejo de cambio, como lo reflejan los valores de V-Al correspondientes a los horizontes AB y Bt1. En las tres profundidades se superan ampliamente el 20% que es el nivel que se considera como umbral de

fitotoxicidad.

En la Figura 1 se representan los valores medios de la producción de centeno obtenida durante los dos años de cultivo y para cada una de las enmiendas calizas empleadas. El efecto corrector se manifiesta más claramente durante el segundo año, resultando el tratamiento con espuma de azucarera el más efectivo de los cuatro productos, seguido por la dolomita y caliza.

En base a la totalidad de los parámetros analíticos obtenidos durante los dos años y los cuatro muestreos realizados, así como los cuatro materiales calizos, se han establecido los modelos de regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados predictivos de la producción total de biomasa de centeno. El método aplicado fue el de stepwise en el que cada una de las variables se examina en cada paso para entrar o salir del modelo de acuerdo con los criterios especificados.

Junto a las ecuaciones deducidas para cada modelo, se presentan los estadísticos que evalúan el ajuste del modelo de regresión. Se trata del coeficiente de determinación R² y la prueba F de la ANOVA que nos

Tabla 2- Caracterización general del suelo

horizonte	profundidad (cm)	pH-H ₂ O	pH-KCl	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	MO (g kg ⁻¹)	CE (dS m ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)
A	0-25	5,01	3,95	57,7	23,1	19,2	24,6	0,031	16,50
AB	25-35	4,83	3,93	54,3	18,4	27,3	6,5	0,035	4,40
Bt	35-55	4,69	3,64	42,5	11,2	46,3	6,8	0,052	3,90

Tabla 3 - Composición del complejo de cambio. Valores en $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$

horizonte	Ca	Mg	Na	K	Ca/Mg	Al	CIC	V-b (%)	CICE	V-Al (%)
A	1,40	0,20	0,03	0,21	7,0	1,14	5,70	32,18	2,97	38,33
AB	1,32	0,18	0,02	0,13	7,3	1,64	5,48	30,12	3,29	49,84
Bt1	1,87	0,30	0,03	0,12	6,2	3,10	9,45	24,68	5,43	57,07

permite contrastar globalmente si existe una relación significativa entre los parámetros medidos y la producción obtenida. Además, a efectos de evaluar la estabilidad y la verosimilitud de los coeficientes de regresión estandarizados e individuales se tuvieron en cuenta las significaciones correspondientes tanto a la constante

como al resto de los coeficientes de regresión. Finalmente, para cada uno de los modelos predictivos se presenta el estadístico de Darwin-Watson como un estimador de la posible autocorrelación entre los errores; cuando estos son aleatorios e independientes el estadístico Dw presentará un valor próximo a 2.

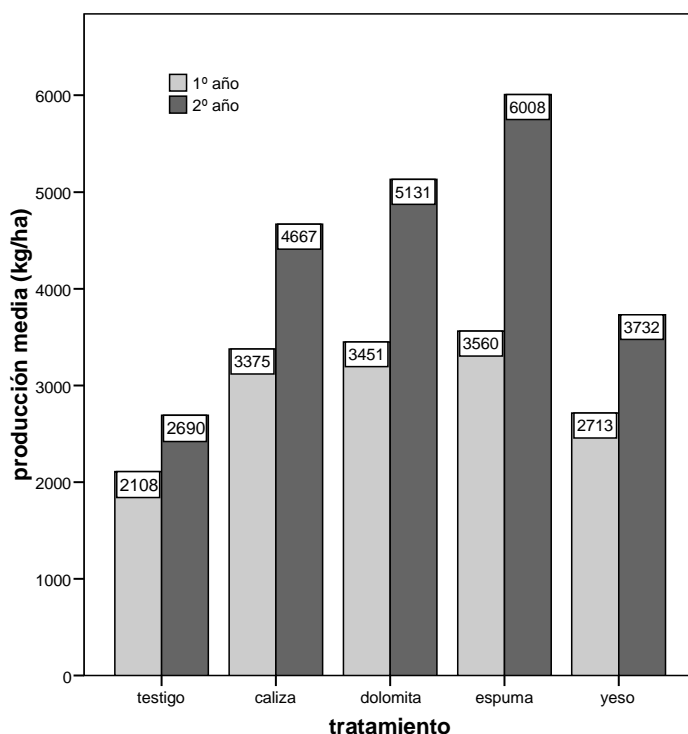


Figura 1 - Valores medios de la producción de centeno por tratamiento y año de cultivo

Modelos de producción correspondiente al primer año de cultivo

Se han desarrollado tres modelos. En el primero se consideran los parámetros correspondientes a las tres profundidades muestreadas: A1-A2-AB; en el segundo únicamente los dos subhorizontes del A (A1-A2), y en el tercer modelo sólo se considera el subhorizonte más superficial, es decir el A1.

Modelo con horizontes A1-A2-AB
 Producción=4453,9-0,850*V-A1-0,594*MO-0,332*CE+0,398*Al-BaCl₂-0,214 Na

$R^2 = 0,412$; $F = 0,000$; $D_w = 0,848$

Modelo con horizontes A1-A2
 Producción=4261,1-0,903*V-A1-0,432*CE-0,333*Ca/Al-0,228*Na

$R^2 = 0,591$; $F = 0,000$; $D_w = 1,038$

Modelo con el horizonte A1

Producción=3468,5-0,779*Al-KCl
 $R^2 = 0,606$; $F = 0,000$; $D_w = 1,423$

Modelos de producción correspondiente al segundo año de cultivo

Modelo con horizontes A1-A2-AB
 Producción=7031,6-0,785*V-A1-0,407*MO

$R^2 = 0,519$; $F = 0,000$; $D_w = 0,984$

Modelo con horizontes A1-A2
 Producción=2837,9-0,494*V-A1-0,279*Na+0,398* pH-H₂O

$R^2 = 0,705$; $F = 0,000$; $D_w = 1,796$

Modelo con el horizonte A1

Producción=2391,0+1,500*V-b-0,678*Ca

$R^2 = 0,865$; $F = 0,000$; $D_w = 1,792$

A la vista de los modelos obtenidos cabe destacar, en primer lugar, cómo los valores de R^2 (explicación de la varianza) aumentan conforme disminuye, a su vez, el número de horizontes considerados en

el modelo predictivo. Este aspecto se pone de manifiesto tanto en el primero como en el segundo año de ensayo. Por otra parte, se comprueba que la máxima explicación de la varianza de la producción ($R^2=0,865$) se obtiene durante el segundo año de cultivo y para el caso concreto de considerar únicamente el subhorizonte A1 ($R^2=0,865$). De igual modo, se observa que la complejidad del modelo crece, aumentando así el número de variables explicativas que entran en la ecuación, cuando se tienen en cuenta los tres horizontes de muestreo.

En todos los casos las F resultan significativas al nivel de $p=0,05$, lo que prueba la existencia de relación lineal entre la producción y los parámetros que entran en cada modelo. La independencia de residuos queda garantizada particularmente en el caso de considerar sólo el subhorizonte A1, donde el estadístico de Durwin-Watson oscila en el intervalo de 1,5-1,8.

Como resulta lógico, los parámetros de V-A1, contenido de MO y el Al-KCl influyen negativamente sobre el pronóstico de la producción. Por el contrario, los incrementos que experimentaron tanto el porcentaje de saturación de bases (V-b) como el pH-H₂O, entre el primero y el segundo año de cultivo, se tradujo en un efecto positivo sobre la producción. Finalmente, la posible explicación que justifica el carácter negativo que presenta el coeficiente de regresión correspondiente al Ca de cambio durante el segundo año hay que atribuirla a la reducida incorporación y solubilización que experimentaron, a lo largo de los dos años, los productos calizos aplicados al suelo.

Finalmente, se exponen los modelos de regresión obtenidos a partir únicamente de las tres formas de Al analizadas, es decir el Al-CaCl₂, Al-KCl y el Al- BaCl₂, y considerando únicamente el subhorizonte

más superficial (A1)

Modelo con el horizonte A1 y para el primer año de cultivo

$$\text{Producción} = 3362,0 - 0,810 \cdot \text{Al-CaCl}_2$$

$$R^2 = 0,656; F = 0,000; D_w = 2,218$$

Modelo con el horizonte A1 y para el segundo año de cultivo

$$P = 5374,5 - 0,858 \text{Al-KCl}$$

$$R^2 = 0,737; F = 0,000; D_w = 1,881$$

De estos últimos resultados cabe destacar que el mejor ajuste logrado en este tipo de modelo (R^2) se alcanza también durante el segundo año de cultivo ($R^2=73,3\%$). Las F resultan igualmente significativas al nivel de $p=0,05$. Estos nuevos resultados parecen confirmar también que la forma de Al más tóxica durante el primer año hay que asociarla al Al-CaCl₂, es decir el considerado como soluble y fácilmente intercambiable, mientras que durante el segundo año la fitotoxicidad se atribuye más bien al contenido remanente de Al-KCl.

CONCLUSIONES

Se han establecido unos modelos de regresión lineal múltiple para explicar la producción total de biomasa de centeno obtenida sobre un suelo extraácido de *raña* (León, España) que previamente fue corregido con cuatro productos calizos: caliza, dolomita, espumas de azucarería y yeso. Los ensayos duraron dos años. Los resultados demuestran, por una parte, que la bondad del modelo explicativo y, por tanto la varianza explicada aumenta conforme disminuye el número de horizontes de suelo considerados en el modelo. Los máximos valores de R^2 se obtuvieron considerando únicamente el subhorizonte A1 (0-12 cm), alcanzándose una $R^2=0,865$. Los parámetros de suelo

más correlacionados con la producción fueron el V-Al, V-b y el Al-KCl. Finalmente, se obtuvieron los modelos de regresión lineal múltiple en el intervinieron solamente las tres formas de Al analizados durante los ensayos: el Al-CaCl₂, Al-KCl y el Al-BaCl₂. También, para el caso de considerar el subhorizonte más superficial A1, los valores explicativos resultaron altos: $R^2=0,656$ para el primer año y en función únicamente del Al-CaCl₂, y de $R^2=0,737$ para el segundo año, siendo el KCl el parámetro mejor correlacionado con la producción.

AGRADECIMIENTOS

A la Consejería de Educación y Universidades de la Junta de Castilla y León por la concesión del proyecto de investigación LE-04/01, gracias al cual hemos podido realizar este trabajo. A la Junta Vecinal de Rioseco de Tapia (León) por la cesión del terreno donde se ubicaron las parcelas de ensayo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boul, S.W., Hole, F.D., Mc Craken, R.J., & Southard, R.J. 1994. Soil genesis and classification. Iowa State University Press, Ames.
- Espejo Serrano, R. 1987. The soil and ages of the *raña* surfaces related to the Villuercas and Altamira mountain ranges. *Catena*, 14:399-418.
- FAO. 1998. World Reference Base for Soil Resources World Soil Resources Reports No 84. FAO, ISRIC&ISSS, Rome.
- Hoyt, P.B. & Nyborg, M. 1972. Use of dilute calcium chloride for the extraction of plant-avaible aluminum and manganese from acid soil. *Can. J. Soil Sci*, 52: 163-

- 167.
- Jackson, M.L. 1976. *Soil Chemical Analysis*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ, p.662.
- Kilmer, V.J. & Alexander, L.T. 1949. Methods of making mechanical analyses of soils. *Soil Sci*, 68: 15-24.
- Kinrade, T.B. & Parker, D.R. 1987. Non phytotoxicity of the aluminium sulfate ion $AlSO_4^+$. *Phisologia Plantarum*, 71: 207-212.
- Kinraide, T.B., Ryan, P.R. & Kochian, L.V. 1992. Interactive effects of Al^{3+} , H^+ , and other cations on root elongation considered in terms of cell-surface electrical potential. *Phisologia Plantarum*, 99:1461-1468.
- Lin, C. & M.T. Coleman, M.T. 1960. The measurement of exchangeable aluminum in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24: 444-446.
- Lund, Z.F. 1970. The effect of calcium and its relation to several cations in soybean root growth. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:456-459.
- Noble, A.D., Summer, M.E. & Alva, A.K. 1988. The pH dependency of aluminium phytotoxicity alleviation by calcium sulphate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1398-1402.
- Pavan, M.A., Bingham, F.T., & Pratt, P.F. 1982. Toxicity of aluminium to coffee in Ultisols and Oxisols amended with $CaCO_3$, $MgCO_3$ and $SO_4Ca.2H_2O$. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:1201-1207.
- Peech, M., Alexander, L.T., Dean, L.A. & Reed, J.F. 1947. *Methods of soil analysis for soil fertility investigations*, p. 25 U.S. Dept. Agr, C 757.
- Reeve, N.G. & Summer, M.E. 1970. Effects of aluminium toxicity and phosphorus fixation on crop growth on oxisols in Natal. *Soil Sci Soc. Am. Proc.*, 34:263-267.
- Reeve, N.G. & Summer, M.E. 1972. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface -applied amendements. *Agrochemophisica*, 4: 1-6.
- Ritchey, K.D., Feldhake, C.M., & Clarke, R.B. 1995. Improved water and nutrient uptake from subsurface layers of gypsum-amended soils. In *Agricultural Utilization of Urban and Industrial By-products*. D.L. Karlen, R.J. Wright and W.O.Kemper (eds.), pp.157-181. ASA Special Pub. 58, Madison, WI.
- Shainberg, I., Sumner, M.E., Miller, W.P., Pavan, M.A. & Fey, M.V. 1989. Use of gypsum in soils: A review. *Adv. Soil Sci*, 13:1-111.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. Agriculture Handbook No.436. USDA Government Printing Office, Washington, DC.
- Walkley, A. & Black, I.A. 1934. An examination of the Dejtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the cromic acid titration method. *Soil Sci*, 37: 29-38.