
Modelación de la materia orgánica en suelos volcánicos de la región de Teziutlán, Puebla, México

M. Castillo-Morales^{1*}, G. Linares-Fleites², M. A. Valera-Pérez², N. E. García-Calderón³, O. A. Acevedo-Sandoval⁴

¹Doctorado en Ciencias Ambientales y ²Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas, Instituto de Ciencias-Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

³Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma México.

⁴Centro de Investigación en Ciencias de la Tierra, Instituto de Ciencias Básicas e Ingenierías, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Organic matter modeling in volcanic soils from the Teziutlán region, Puebla, Mexico

Abstract

At present, the relevance that the organic matter modeling has, it is closely linked to the relationship that Organic Matter keeps with Soil Organic Carbon. The last, has a direct impact on Carbon storage in soils and hence in mitigating of CO₂ emissions, one of the Greenhouse Effect Gases (GHG's) of higher importance. The objective of this study was to model the organic carbon content based on the properties of volcanic soils, using the Partial Least Square Regression. As a result it is noted that of all the soils properties considered in the study only the Bulk Density, the% of Total Nitrogen, the% of Al and Fe extractables, the Cationic Exchange Capability and the soil reaction (water and KCl) were the most related variables with Organic Carbon Soil and; of these properties, which presents a more marked relationship was the Bulk Density. It was also noted that some environmental conditions, such as rainfall and altitude are closely related to the storing carbon process in soil.

Key words: forest soils, weather change, organic matter, PLS regression.

Resumen

La relevancia que tiene en la actualidad la modelación de la materia orgánica, se encuentra íntimamente ligada a la relación que ésta propiedad guarda con el Carbono Orgánico del Suelo. Este último tiene una incidencia directa en el almacenamiento del carbono en el compartimiento suelo y, por ende, en la mitigación de las emisiones de CO₂, uno de los Gases de Efecto de Invernadero (GEI) de mayor importancia. El objetivo del presente trabajo fue modelar el contenido de carbono orgánico en función de las propiedades de suelos volcánicos, mediante la técnica de Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales. Como resultado cabe señalar que de la totalidad de las propiedades del suelo consideradas en el estudio sólo la Densidad Aparente, el % de Nitrógeno Total, el % Al y % Fe extraíbles, la Capacidad de Intercambio Catiónico y la Acidez hidrolítica e Intercambiables fueron las variables que más relación guardan con el Carbono Orgánico del Suelo y; de esas propiedades, la que presenta una relación más marcada es la Densidad Aparente. También se observó que algunas condiciones ambientales, tales como la precipitación y la altitud guardan una estrecha relación con proceso de almacenamiento del carbono en el suelo.

Palabras clave: suelos forestales, cambio climático, materia orgánica, regresión PLS.

* Autor de correspondencia

E-mail: maribel.castillo@fi.buap.mx; FAX: 01 (222) 229-55-00 Ext. 7351

Introducción

El cambio climático es un problema con características únicas, (Martínez *et al.*, 2004) ya que es de naturaleza global, sus impactos mayores serán a largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos) y procesos sociales, económicos y políticos a escala mundial. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) lo define como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (Tinoco, 2008). A partir de la realización de la “Cumbre de la Tierra” en Río de Janeiro en 1992, se incorporó una perspectiva integral económico-ecológica con un enfoque de conservación y manejo sostenible de los recursos naturales, enmarcando la cuantificación de los bienes y servicios ambientales, los cuales han cobrado gran importancia en los últimos años.

Una de las fuentes más importantes de bienes y servicios ambientales son los ecosistemas forestales. Entre las consecuencias graves de su disminución se encuentran la pérdida de la biodiversidad y el aumento de gases de efecto invernadero (GEI), lo que ha influido en el establecimiento de acuerdos internacionales sobre el manejo y preservación de los bosques. El secuestro de carbono es una opción de mitigación de las emisiones de GEI. El secuestro de carbono se relaciona de manera directa con la materia orgánica del suelo (MOS), la cual se define como la fracción orgánica constituida por una mezcla compleja de compuestos de bajo, medio y alto peso molecular. La MOS es el componente del suelo más complejo, dinámico y activo y su importancia reside en su contribución al desarrollo de las plantas y su influencia en las propiedades de los suelos (García y Galicia, 2008), además de ser un componente muy importante de los ecosistemas. Un indicador usual de la materia orgánica del suelo es el contenido de carbono orgánico, con el cual, las propiedades biológicas, químicas y físicas del suelo están fuertemente correlacionadas (Linares *et al.*, 2008).

La modelación de la materia orgánica en suelos está ganando reconocimiento como parte clave de los mejores esfuerzos para entender y manejar el ciclo

del carbono terrestre. La influencia de este ciclo sobre las emisiones de GEI y su porcentaje de captura, y las reacciones potenciales sobre el cambio climático a largo plazo, se han convertido en un importante reto para la ciencia (Paustian, 2000).

En este trabajo se persiguió el objetivo de modelar el contenido de carbono orgánico en suelos volcánicos en función de las propiedades, mediante la técnica de Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS) en la Región de Teziutlán, Puebla, México.

En el epígrafe II se describe el área de estudio, se describe lo realizado en este estudio, así como se presenta la información teórica referente al tratamiento del problema y en el epígrafe III se dan a conocer los resultados obtenidos del análisis realizado y se hace una discusión sobre los mismos.

Material y método

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en los suelos de la Región de Teziutlán, situada en la porción nororiental del estado de Puebla y que comprende una porción de la Región Terrestre Prioritaria para la Conservación en México (RPT-105), situada entre los paralelos 19°43'30" y 20°14'54" de latitud norte y los meridianos 97°07'42" y 97°43'30" de longitud occidental.

Estos suelos derivados de material piroclástico, después de la prospección pedológica fueron clasificados como Andisoles (Soil Survey Staff, 2006), cubren una superficie de 846 km². La caracterización física y química de las muestras de suelo se efectuó de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000), determinándose 24 propiedades en muestras obtenidas de los horizontes A y B de 21 perfiles de suelo dispuestos en localizaciones no regulares representativas de la zona de estudio (Fig. 1).

Análisis Estadístico

La información obtenida se analizó por la técnica de Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (Partial Least Square en inglés PLS) (Hervé, 2007). Para dicho análisis, se tomó como variable dependiente del modelo el contenido en carbono orgánico total (%CO) y como predictores la Altitud

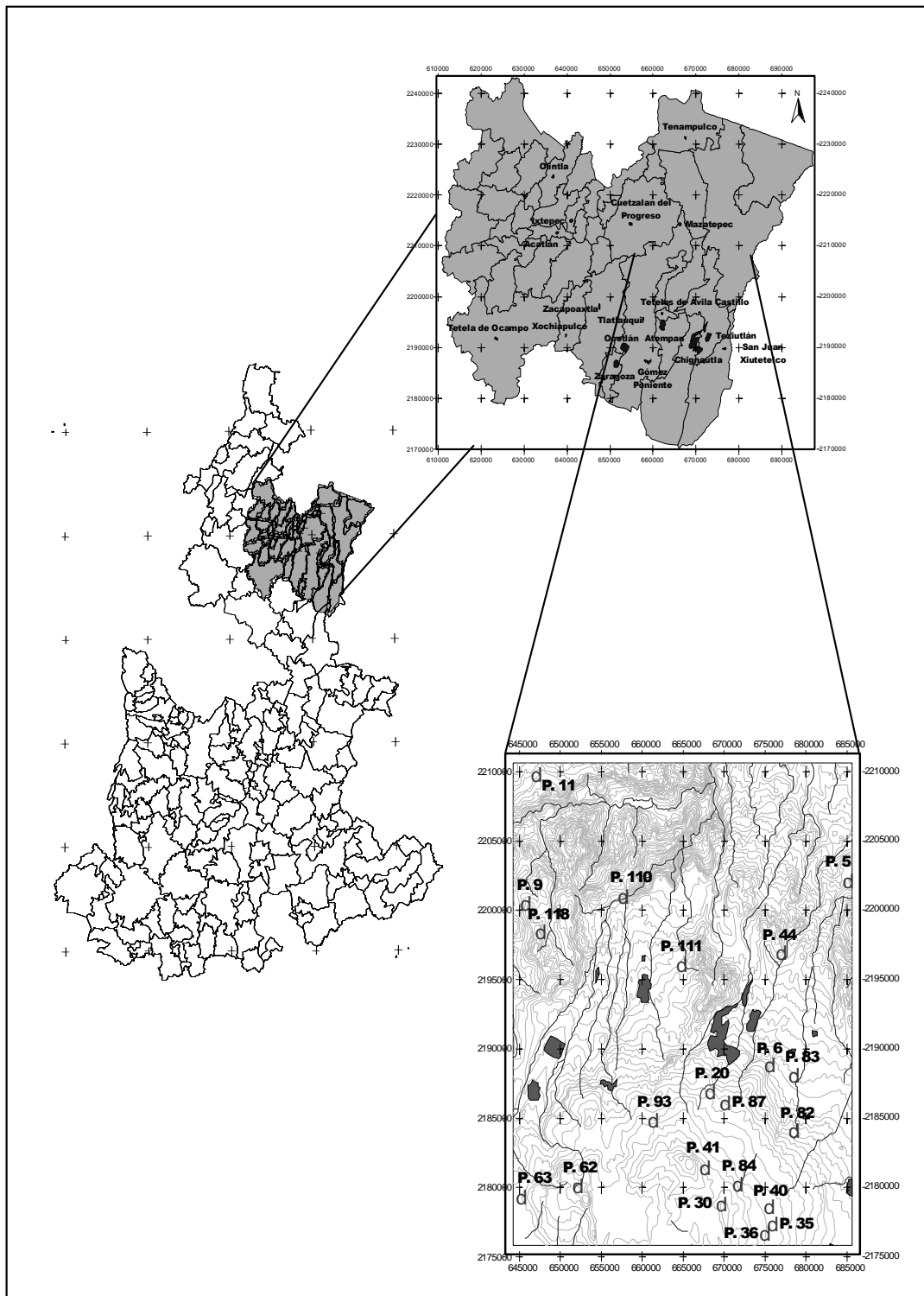


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.

y la Precipitación media anual, además de las siguientes propiedades del suelo: Profundidad, Densidad Aparente (DA), % Arena, % Limo, % Arcilla, Contenidos de Nitrógeno Total (%NT), Relación C/N, contenidos en Al y Fe activos (%Al y %Fe), retención de fosfatos, pH en NaF 1N, Acidez hidrolítica (ah) e intercambiable (ai), Delta pH, Capacidad de Intercambio Catiónico Total (CIC), Porcentaje de saturación en bases (%V), Ca, Mg, Na y K Intercambiables. Los datos fueron analizados en el sistema Minitab (Minitab, 2005), donde la matriz de correlación de los predictores mostró una alta correlación entre los mismos.

Regresión por Mínimo Cuadrado Parcial (Regresión PLS)

La Regresión por mínimos cuadrados parciales es un método para construir modelos predictivos cuando los factores son muchos y altamente colineales (Hervé, 2007), como es el caso que nos ocupa.

Para llevar a cabo la regresión de Y (%CO) con las variables independientes X_1, \dots, X_p (DA, % Arena, % Limo, % Arcilla, %N Total, Relación C/N, %Al y %Fe extraíbles, retención de fosfatos, pH en NaF 1N, ah e ai, Delta pH, CIC, %V, Ca, Mg, Na y K Intercambiables), la regresión PLS trata de encontrar nuevos factores que juegan el mismo papel que las X 's. Estos nuevos factores se llaman variables latentes o componentes. Cada componente es una combinación lineal de X_1, \dots, X_p , PLS usa tanto la variación de X como de Y para construir los nuevos factores que se usarán como variables explicatorias del modelo. Existen diferentes algoritmos para obtener los estimadores de la regresión PLS, pero los más usados son el NIPALS y el SIMPLS (Montgomery et al., 2004).

Estadísticos PRESS y R^2

La Suma de Cuadrados de Error de Predicción, conocida como la estadística PRESS, se considera una medida de lo bien que funciona un modelo de regresión para predecir nuevos datos. Se define como la suma de los residuales PRESS al cuadrado que son los residuos que se obtiene entre el valor observado y el valor predicho de la i -ésima respuesta observada, basado en un ajuste de modelo con los $n-1$ puntos restantes de la muestra (Montgomery et al., 2004).

Una aplicación muy importante de estos estadísticos

es comparar modelos de regresión. En general un modelo con pequeño valor de PRESS es preferible a uno con PRESS grande. El estadístico R^2 utilizado usualmente para medir la bondad del ajuste del modelo a los datos: a mayores valores de estos estadísticos, mayor es la bondad del ajuste.

Resultados y discusión

Del análisis realizado, el mejor modelo fue aquél definido con una sola componente principal, esto con una R^2 de 0.36 y un estadístico PRESS de 397.3 respectivamente, lo cual se muestra en la tabla 1. El estadígrafo $F(1,40)$ fue significativo con un p empírico de 0.000, mostrado en la tabla 2. Las propiedades: DA, %NT, %Al, %Fe, CIC, ah y ai alcanzaron los más altos coeficientes estandarizados, referidos a la tabla 3. Por otro lado, la influencia de los predictores sobre la respuesta se obtuvo de la tabla de saturaciones de la componente principal (Tabla 4), destacándose la alta influencia de DA, ah y ai con signos negativos, y %NT, %Al, %Fe y CIC con signos positivos, con respecto al %CO, los cuales se muestran en la figura 3. En la figura 2, se resalta la importancia de la DA como una de las propiedades de los suelos importantes para el modelo, por lo que se analizó también el modelo para dos componentes principales, esto para una mejor comprensión y visualización del fenómeno estudiado, de donde, se obtuvo la figura de la cual se hace mención. Se confirma así, la importancia de la DA como una propiedad que coadyuva a la comprensión del fenómeno de la dinámica del almacén de C en los suelos (Post et al., 1999), así mismo en los suelos estudiados de esta zona (Linares et al., 2005) y ratificada en trabajos posteriores (González et al., 2008). Los suelos de esta región son de origen volcánico y presentan propiedades típicas de los Andisoles (Valera et al., 2006). Por otra parte, se destaca la influencia sobre la respuesta (%CO) de los elementos altitud (con signo negativo) y precipitación (con signo positivo), lo que ratifica la influencia de algunas condiciones ambientales sobre el %CO del suelo (Tabla 4).

Conclusiones

La modelación puede dar resultados más rápidos sobre las direcciones y cantidades de cómo cambiará la materia orgánica en la zona de estudio.

Tabla 1. Selección de Modelo y validación para % CO

X Varianza	Error ME	R ²	PRESS
0.190745	178.600	0.364160	397.3
	146.631	0.477973	829.0
	128.287	0.543283	1168.6
	117.105	0.583093	1409.5
	111.247	0.603946	1538.9
	107.838	0.616082	1585.9
	104.731	0.627146	1634.4
	102.099	0.636513	1732.5
	100.800	0.641139	1798.9
	99.000	0.647546	1819.2
	98.055	0.650912	1735.3
	97.585	0.652586	1748.3
	97.231	0.653844	1704.5
	96.838	0.655244	1707.1
	96.522	0.656371	1728.2
	96.393	0.656829	1743.2
	96.231	0.657405	1768.4
	96.039	0.658090	1749.3
	95.907	0.658558	1765.3
	95.594	0.659675	1795.8
	95.401	0.660359	1773.8
	95.331	0.660611	36290.1

Tabla 2. Análisis de Varianza para % CO

Fuente	Grados de Libertas (GL)	Muestras Estandarizadas (ME)	Media Muestral (MM)	Est. F	Valor - p
Regresión (R)	1	102.288	102.288	22.91	0.000
Error residual (ER)		178.600	4.465		
Total		280.889			

Tabla 3. Coeficientes de la Regresión PLS

	% C Org.	% C Org. estandarizado
Constante	8.94761	0.000000
Altitud	-0.00022	-0.046034
Precipitación media anual	0.00027	0.055985
Profundidad	-0.00920	-0.079209
Densidad Aparente	-3.82493	-0.145212
% Arena	-0.00604	-0.036958
% Limo	0.00703	0.027331
% Arcilla	0.00919	0.033371
% N. Tot.	0.26946	0.066509
C/N	0.03216	0.037656
% Retención Fosfatos	0.01075	0.052602
% Al Extraible	0.22787	0.093271
% Fe Extraible	0.30609	0.053888
pH (NaF 1N)	0.00451	0.031138
Ah	-0.38042	-0.097333
Ai	-0.55039	-0.124115
Delta pH	0.21924	0.030750
CIC	0.01822	0.083578
% V	-0.00401	-0.023616
Ca	0.08439	0.058413
Mg	-0.03468	-0.020522
Na	0.19540	0.046049
K	-0.06761	-0.017732

Tabla 4. Cargas de los predictores X.

	Componente 1
Altitud	-0.274516
Precipitación media anual	0.289026
Profundidad	0.001037
Densidad Aparente	-0.347138
% Arena	-0.021549
% Limo	0.028962
% Arcilla	0.006067
% N. Tot.	0.111508
C/N	0.060961
% Retención Fosfatos	0.322974
% Al Extraíble	0.375552
% Fe Extraíble	0.296501
pH (NaF 1N)	0.125081
Ah	-0.375159
Ai	-0.323236
Delta pH	0.164432
CIC	0.285262
% V	-0.188625
Ca	0.072935
Mg	-0.164258
Na	0.189085
K	-0.040013

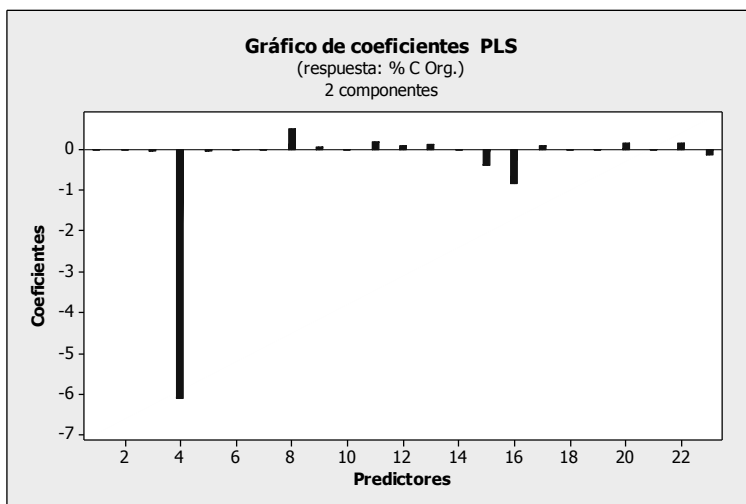


Figura 2. Gráfico de Coeficientes PLS.

Además de lo anterior, se ha logrado ratificar la importancia de la Densidad Aparente como una propiedad del suelo que se encuentra íntimamente relacionada a los cambios del carbono orgánico del suelo. Así mismo, se enmarca la influencia directa que tienen algunas de las propiedades ambientales en la dinámica del carbono en el suelo en el caso específico de la zona de estudio, debido

básicamente al tipo de clima y vegetación que predomina.

Agradecimientos

Proyectos VIEP 2007-2008: No. 00177 Evaluación y Modelación de la cantidad y calidad de carbono secuestrado en suelos forestales.

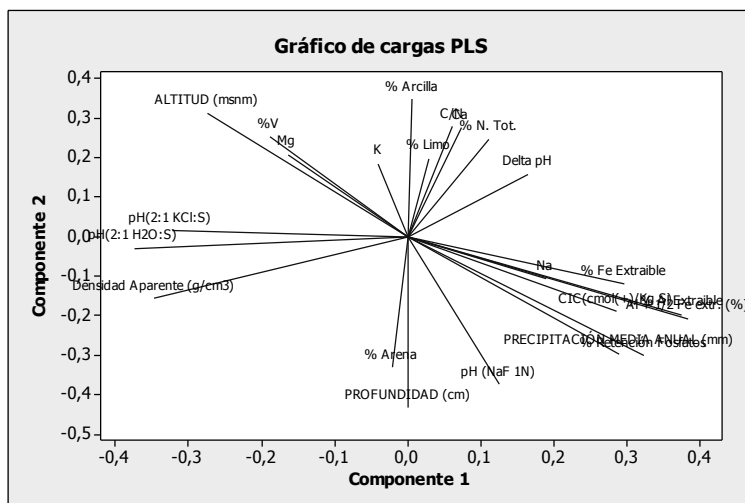


Figura 3. Gráfico de Cargas PLS

Bibliografía

- García Calderón N.E. y Galicia Palacios M. del S. 2008. Transformación de la materia orgánica del suelo. Taller de actualización: metodologías para la investigación aplicada en sistemas agroproductivos y forestales RE. No. ECBUAP-ICUAP-DICA/T-135/07. Puebla, México, pp. 64-101.
- González Molina L., Etchevers Barra J. D. y Hidalgo Moreno C. 2008. Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*, 42:741-751.
- Hervé A. 2007. Partial Least Square Regression PLS-Regression. In: Neil Salkind (ed), *Enciclopedia of Measurement and Statistics*. Thousand Oaks (CA): Sage.
- Linares Fleites G., Valera Pérez M. A., Castillo Morales M. y Sandoval Solís M. de L. 2008. Relación del Contenido orgánico y el nitrógeno en suelos forestales de Teziutlán, Puebla. En: *Memorias del VII Congreso Internacional XIII Congreso Nacional III Congreso Regional de Ciencias Ambientales*, Sonora, México.
- Linares Fleites G., Valera Pérez M. A. y Castillo Morales M. 2005. Regresión múltiple para la interpretación de configuraciones de suelos en la Sierra Norte de Puebla obtenidas por escalamiento multidimensional. En: *Memorias en extenso del XX Foro Nacional de Estadística*, Guanajuato, México, pp. 77-83.
- Martínez, J., Fernández A. y Osnaya P. 2004. Cambio Climático: una visión desde México. INE-SEMARNAT. México. pp. 525.
- McKenzie N., Ryan P., Fogarty P. y Wood J. 2000. Sampling, Measurement and Analytical Protocols for Carbon Estimation in Soil, Litter and Coarse Woody Debris. National Carbon Accounting System Technical Report No. 14. Australian Greenhouse Office, Australia, pp. 19-20.
- MINITAB. Release 15. 2005. Statistical Software. Minitab Inc.
- Montgomery D. C., Peck, E. A. and Vining G. (2004). *Introducción al análisis de regresión lineal*. Compañía editorial Continental. México.
- Paustian, K. 2000. Modelling Soil Organic Matter Dynamics - Global Challenges. In: R.M. Rees et al. (ed), *Sustainable Management of Soil Organic Matter*. CABI Publishing, UK.
- Post M. W., Izaurralde C. R. y Mann K. L. 1999. Monitoring and verifying soil organic carbon sequestration. In: N. J. Rosenberg, R. C. Izaurralde y E. L. Malone (Eds), *Carbon Sequestration in Soils: Science, Monitoring, and Beyond*. Proceeding of the St. Michaels Workshop, December 1998. Battelle Press, Columbus, Ohio, pp. 41-66.
- Tinoco Mejía G., 2008. La base científica del cambio climático. *Geominas*. 36:77-85.
- SEMARNAT, 2000. NOM 021-RECNAT-2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.
- Valera Pérez M.A., Linares Fleites G. y Castillo Morales M. 2006. Evaluación de las características y los procesos que ocurren en los suelos. En: *Memorias del Cuarto Congreso Nacional en Ciencias de la Computación*, Puebla, México, pp. 32-36.