

Materia orgánica y textura en la fertilidad de los suelos de San Pedro del Zapallar, Chuquisaca

Organic matter and texture on the soil fertility of San Pedro del Zapallar, Chuquisaca

Jorge Orias^{1*} & Elke Noellemeyer²

¹BEISA 3. Instituto de Agroecología y Seguridad Alimentaria. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Casilla Postal 1046, Calle Calvo N°132, Sucre-Bolivia,

²Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de la Pampa (UNLPam), Santa Rosa – Argentina.

* jorge.orias.23@gmail.com

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la relación de la materia orgánica y la textura, para determinar la fertilidad de un suelo en San Pedro del Zapallar. Para evaluar los contenidos de materia orgánica y la textura del suelo se realizó una selección de tres áreas de muestreo, mediante un SIG ambientes (A, B, C), donde se establecieron los puntos de muestreo. Se tomaron muestras de suelos de nueve calicatas y tres sub muestras por calicata. Se determinó que en el ambiente A presenta mejores condiciones de fertilidad con 3.7 % de MO, en los primeros 10 cm. En cambio los suelos del ambiente B tienen 2.2 % de MO, y solo 1.3% de MO el ambiente C, siendo adecuado el contenido de MO, donde los suelos ubicados en los ambientes A presentan mejores condiciones de fertilidad, en relación a los ambientes B y C. Así mismo se concluye que la MO y la textura son los principales indicadores de la calidad del suelo, porque representan y constituyen la parte física de un suelo. Por lo tanto, la influencia de la historia de uso y el manejo, resultaron estar fuertemente relacionados con la fertilidad de un determinado suelo, ya que de ello depende la productividad de un determinado ambiente.

Palabras clave: Manejo del suelo, muestra de suelo, historia de uso del suelo.

Abstract

The present work had the objective of evaluating the relationship between organic material and texture to determine the fertility of soil in San Pedro del Zapallar. To evaluate the content of organic material and the texture of soil, a selection of three sampling areas was realized, through GIS environments (A, B, C), where the sampling points were selected. Soil samples were taken across nine categories with 3 sub-samples per category. It was determined that the A environment showed the best fertility conditions with 3.7% of MO, in the first 10 cm. In contrast, the soils of the B environment have 2.2% of MO, and only 1.3% of MO in the C environment. The soils of the A environment showed an adequate MO content and better fertility conditions in comparison with the B and C environments. It was thus concluded that MO and texture are the principle indicators of soil quality, because these variables constitute the physical part of the soil. In this manner, the influence of the history of soil use and the management, were identified as being strongly correlated with fertility of a specific soil, and on which depends the productivity of a specific environment.

Key words: history of land use, soil management, soil sample.

Introducción

La materia orgánica es un factor clave en el mantenimiento de las funciones del suelo, ya que influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Sin embargo, cumple funciones esenciales en la estructura y estabilidad del suelo (Tisdall & Oades 1982, Six et al. 2002), determina su fertilidad (Reeves 1997), mejora su capacidad de retención de agua (Hudson 1994) y en su resistencia a la penetración por raíces (Zou 2000), además aumenta su resistencia a la erosión favoreciendo la infiltración del agua (MacRae & Mehuys 1985, Boyle et al. 1989, Pikul y Zuzel 1994), contribuye a evitar la contaminación de los cursos de agua, gracias a su papel de filtro natural (Camps-Arbestain et al. 2004); influye en la actividad enzimática del suelo (Dick 1984) y en la composición de la comunidad microbiana (Grayston & Presscott 2005).

La materia orgánica de los suelos además de proporcionar nutrientes al suelo, también genera una serie de características físicas entre las que se destaca la capacidad de retención de agua, permitiendo que en zonas donde las lluvias son muy espaciadas se puedan mantener los cultivos adecuadamente (Hernando1988), lo que favorecería a su vez la producción y mantenimiento de los pastizales durante el periodo seco. En este sentido, la materia orgánica tiene que ser vista desde su importancia en la producción agrícola (Borges et al. 2012). Se podría indicar que la cantidad y calidad de la misma depende principalmente de la topografía y el material parental. La degradación de los nutrientes del suelo está relacionada con la pérdida de materia orgánica (Gartzia 2009). Un aspecto muy importante en los sistemas donde la extracción de biomasa arbórea puede disminuir progresivamente la cantidad de nutrientes disponibles en el suelo, sobre todo si los restos de corta no se quedan en las áreas habilitadas (Jhonson & Todd 1998, Olsson et al. 2000).

Chuquisaca se encuentra en una región donde la agricultura es una de las actividades económicas más importantes para los pobladores de las comunidades rurales y es considerada como una de las principales zonas productoras de maní a nivel nacional (Hartwich et al. 2007, IBCE - CANEB 2007), siendo Bolivia uno de los cuatro principales productores de

maní en Sudamérica (IBCE - CNDA 2010). Igual que el maní, Chuquisaca también se destaca en la producción de ají, las principales zonas productoras son Tomina, Hernando Siles, Luis Calvo y Villa Serrano (Rocabado 2001, USAID/Bolivia 2009).

Por esta situación, en Chuquisaca la agricultura practicada en forma tradicional es de vital importancia, caracterizándose por un sistema migratorio de “*roza, tumba y quema*”, que luego de unos años estos espacios se convierten en áreas abandonadas y ocupadas por vegetación espontánea, formando bosques secundarios (Coronado 2010). Entonces la intensificación de la producción agrícola en los diferentes ambientes, podría desencadenar la degradación de los suelos, por el mal uso y manejo de las áreas productivas (Orias 2014).

En consecuencia, podemos relacionar que el efecto de la topografía sobre las propiedades del suelo, asociada a su importancia a lo largo de la historia de uso, y la ubicación de los terrenos de los mismos se convierte en un factor de gran relevancia, para determinar el estado de los suelos. Por consiguiente, la información que podría ser un buen fundamento, para comprender la variabilidad y heterogeneidad de las propiedades intrínsecas de los suelos gira en torno de los conceptos planteados por Jenny (1941), que estipula que las propiedades de un suelo son función de cinco factores formadores (clima, organismos, relieve, material parental y el tiempo), que inciden sobre los procesos pedogenéticos.

En este sentido, se plantean las siguientes preguntas: 1) ¿Podrían los contenidos de materia orgánica modificar las características texturales? 2) ¿La materia orgánica y la textura podrían definir la fertilidad de un suelo? 3) ¿La materia orgánica y la textura son los principales indicadores de la calidad de un suelo? 4) ¿La influencia de la historia de uso y manejo está relacionada con la fertilidad de un determinado suelo?, de donde el objetivo de estudio es “Evaluar la relación de la materia orgánica y la textura para determinar la fertilidad de un suelo en San Pedro del Zapallar”, obteniéndose información de relevancia para elaborar pautas y estrategias de manejo conservacionistas de los suelos agrícolas en Chuquisaca, Bolivia.

Materiales y Métodos

Área de estudio

Los suelos seleccionados para este estudio están localizados en San Pedro del Zapallar, una comunidad que está ubicada dentro del Parque Nacional y Área Natural de Manejo Integrado Serranía del Iñao, entre las coordenadas 20°06'36" Latitud sur, 63°26'41" Longitud oeste, en el Cantón Saucos,

Municipio de Monteagudo, Provincia Hernando Siles, del Departamento de Chuquisaca (Fig. 1). La comunidad se encuentra a una distancia de 320 km de la Ciudad de Sucre, limita al este con Huancachi, al oeste con Monteagudo, al norte con los Pinos y al sur con Chuncusla. Tiene una superficie de 3515 has y solo 515 ha son cultivables, presenta una precipitación media anual de 1000 mm y temperatura media anual de 23 °C.

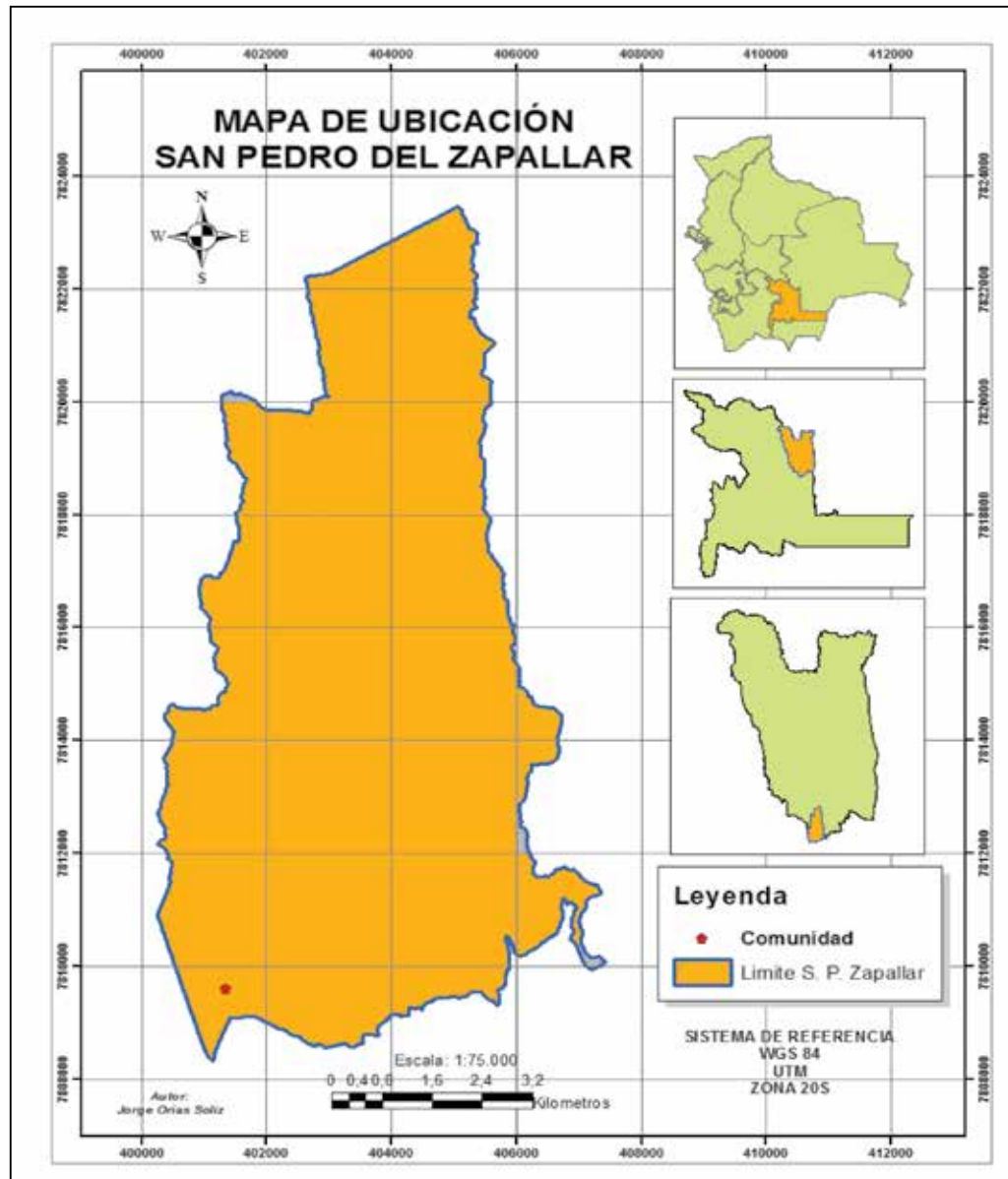


Figura 1. Mapa de ubicación de San Pedro del Zapallar. Municipio Monteagudo.

Diseño experimental

Para determinar los contenidos de materia orgánica y la textura del suelo se realizó una selección *a priori* de tres áreas de muestreo (A, B, y C) mediante un SIG (Sistemas de Información Geográfica), con esta información fue posible verificar y validar la clasificación obtenida en campo, donde se establecieron los puntos de muestreo. Las tres áreas seleccionadas tenían las siguientes características: donde el ambiente A-Planicies al pie de las pendientes, ambiente B-Partes inferiores de las pendientes y el ambiente C-Planicies de inundación de los lechos del río. Se distribuyeron tres puntos por ambiente, donde se realizaron las calicatas con sus respectivos submuestreos.

Muestreo

Para la toma de muestras de suelos, se realizaron nueve calicatas y tres sub muestras por calicata. En cada punto de muestreo se determinaron las características del perfil y cada uno de los horizontes del suelo, la calicata se realizó a una profundidad de 1.20 m o hasta encontrar la tosca o capa freática (Fig. 2 y 3). Cada uno de los horizontes fue descrito y se tomaron muestras con cilindros para densidad aparente. Las sub muestras se tomaron con un barreno a una distancia de 50 m entre sí, a una profundidad de 0-20 cm aproximadamente, según la profundidad de los horizontes del suelo.



Figura 2. Calicata antes de realizar la descripción del perfil, durante el periodo de campo. Ambiente A-Planicies al pie de las pendientes.



Figura 3. Perfil de suelo ambiente A-Planicies al pie de las pendientes, para ser descrito los horizontes, la estructura y textura.

Análisis de datos

Las muestras recolectadas de las calicatas y las muestras compuestas fueron llevadas a laboratorio donde fueron secadas al aire libre y tamizadas por una malla de 2 mm, previo a la realización de los análisis de las propiedades físicas y químicas. Para la determinación de textura se utilizó el método del hidrómetro de Bouyoucos (1962). El pH se midió en solución suelo-agua (2:1) con un electrodo de vidrio. La conductividad eléctrica se determinó en el sobrenadante de la solución usado para determinar el pH, con un conductímetro. El carbono total se determinó por el método de Walkley-Black (Tan 1996). El análisis de los datos de materia orgánica y textura se realizó a través de programa estadístico InfoStat. Los valores se expresan como la media $\pm$ error estándar (E.S.).

Resultados

El ambiente A (Planicies al pie de las pendientes) presenta mejores condiciones de fertilidad, ya que cuenta con 3.7 % de MO, en los primeros 10 cm. En cambio en los suelos del ambiente B (Partes inferiores de las pendientes) se tiene 2.2 % de MO, mientras que en los suelos que conforman el ambiente C (Planicies de inundación de los lechos del río), solo cuenta con 1.3 de MO, en los tres ambientes se puede apreciar la disminución de la materia orgánica en función a la profundidad del perfil (Tabla 1). Mientras que los contenidos de arena, arcilla y limo varían según la profundidad siendo suelos más finos en los primeros 10 cm de profundidad del perfil.

El contenido de MO en cada uno de los ambientes resultó ser adecuado, donde los suelos del ambiente A, presentaron mejores condiciones de fertilidad en

relación a los ambientes B y C. Estos suelos por su ubicación y su textura fina son aptos para todo tipo de cultivos agrícolas y requieren poco cuidado, sobre todo un manejo adecuado. Mientras que el ambiente C, su contenido de MO es bajo, esto debido principalmente a la textura arenosa a franco arenoso, ya que estos suelos son resultado de los aportes fluviales de los lechos de los ríos. Sin embargo, por su ubicación en lugares planos y con un adecuado manejo para la mantención y aumento de MO, estos suelos son considerados como aptos para la agricultura. Por otro lado, están los suelos del ambiente B, con buenos niveles de MO y de textura fina, pero debido a su ubicación en pendientes, estos suelos son considerados como no aptos para la agricultura. Además estos suelos deberían estar bajo un sistema conservacionista con pasturas perennes. En estos suelos se puede apreciar una tendencia, que a mayor profundidad disminuye la cantidad de materia orgánica. Mientras que la textura es mas fina en estos ambientes, favoreciendo a los cultivos, ya que estos suelos no requieren cuidados especiales y

ambientes A, B y C.

no presentan susceptibilidad a la erosión. Además por su ubicación en lugares casi planos beneficia en la retención de agua (Fig. 4).

En estos suelos la mayor dificultad es su ubicación, ya que estos están en lugares con pendiente, que dificulta la retención del contenido de materia orgánica. Sin embargo, a pesar de sus limitaciones se encuentran niveles adecuados, que van disminuyendo con la profundidad del perfil. En relación a la textura es poco variable ya que estos suelos son más finos a mayor profundidad (Fig. 5).

Los suelos de este ambiente por estar ubicados en los bordes de los ríos, presentan aportes fluviales de los ríos, el contenido de materia orgánica es bajo y por lo general son de textura arenosa. Por lo tanto, estos suelos requieren de cierta atención en lo que refiere al incremento de MO y su mantenimiento en el tiempo (Fig. 6).

Tabla 1. Valores obtenidos en cada uno de los

Profundidad	A							B							C											
	10	20	40	60	80	90	120	10	20	30	40	80	100	110	120	10	20	40	60	80	90	100	110	120		
MO (%)	3.7	2.0	1.5	0.8	sd	sd	sd	2.2	1.5	0.6	0.7	0.5	sd	sd	sd	1.3	0.3	0.4	sd	sd	sd	sd	sd	sd		
Arcilla (%)	5.0	4.1	8.4	10.0	3.9	9.5	12.5	4.3	7.1	7.7	9.8	10.3	12.3	9.6	11.0	3.0	2.4	4.0	5.0	4.0	1.6	4.0	1.6	2.3		
Limo (%)	28.8	27.0	26.5	23.5	22.3	20.8	20.9	25.8	24.2	27.3	20.3	20.9	23.8	35.3	20.6	31.1	24.8	13.5	15.8	17.3	0.0	12.3	0.0	9.0		
Arena (%)	66.2	68.8	65.0	88.5	73.8	69.7	66.6	70.0	68.8	65.1	69.9	68.8	63.9	55.1	68.4	65.9	72.7	82.5	79.2	78.7	99.1	83.7	99.1	88.7		
pH	6.3	5.7	5.8	6.1	5.7	6.9	6.1	5.9	5.6	5.1	5.9	5.5	5.8	5.9	5.2	6.1	6.5	6.4	5.3	5.5	8.4	5.6	6.9	5.8		
CE (mS/cm)	0.09	0.07	0.05	0.3	0.12	0.03	0.04	0.06	0.06	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02	0.12	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.13	0.05		

Nota: A = Planicies al pie de las pendientes; B = Partes inferiores de las pendientes; C = Planicies de inundación de los lechos del río.

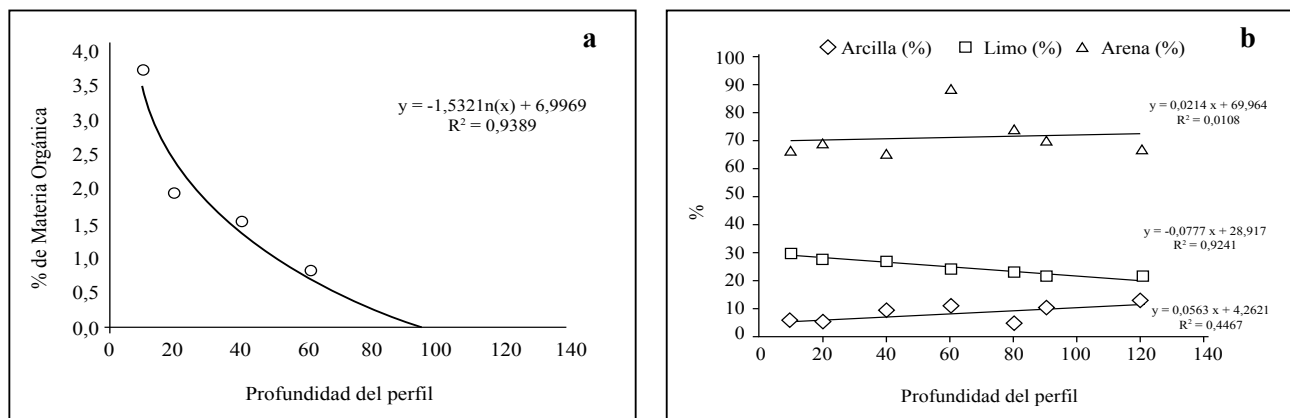


Figura 4. Ambiente A, materia orgánica y textura según la profundidad del suelo.

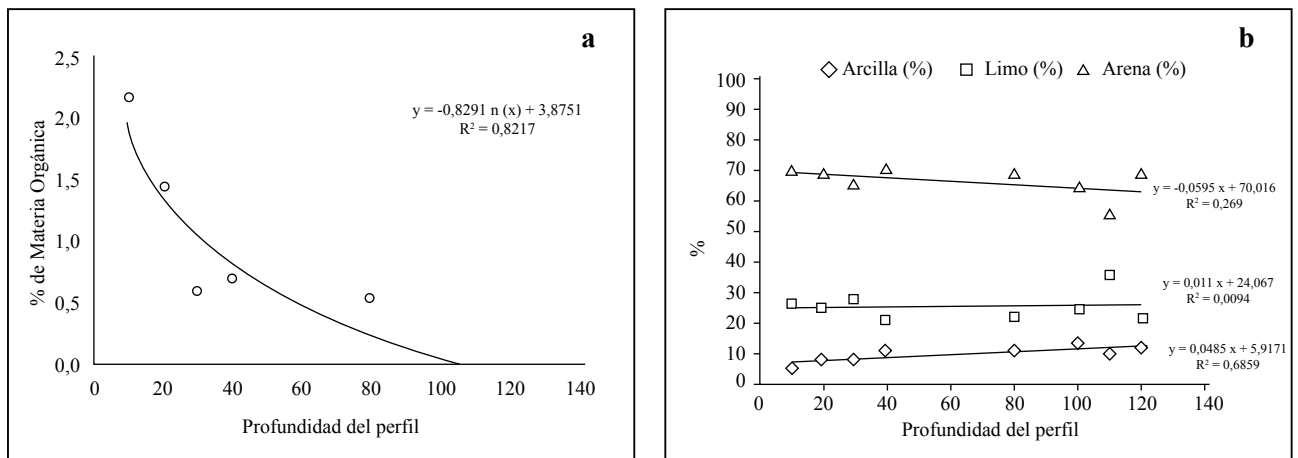


Figura 5. Ambiente B, materia organica y textura según la profundidad del suelo.

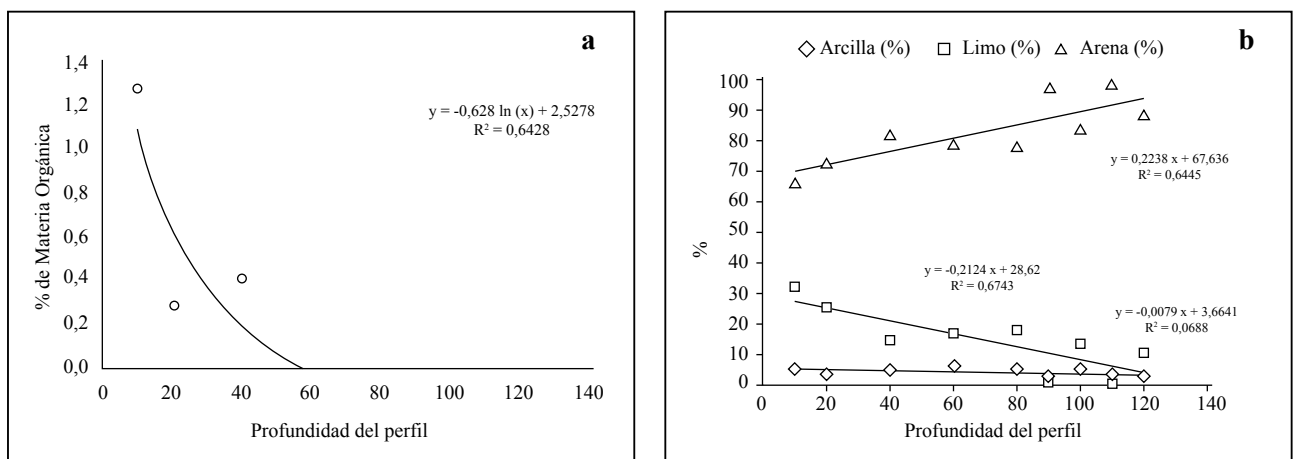


Figura 6. Ambiente C, materia organica y textura según la profundidad del suelo.

Discusión

Según Borges et al. (2012) el contenido de materia orgánica en el suelo es afectada por la textura y el relieve del suelo. La variabilidad de los resultados probablemente se deba a la heterogeneidad de los ambientes y de las propiedades del suelo. En consecuencia podemos afirmar que las características topográficas y el relieve son los principales factores que condicionan los contenidos de las propiedades físicas y químicas de los diferentes ambientes (Orias 2014). Por lo tanto, la fertilidad de los suelos de un determinado ambiente está fuertemente relacionada con la ubicación.

Encontraron que el contenido de MO casi en todas las localidades fue de mediana a alta disponibilidad. Sin embargo, indican que los valores bajos encontrados en relación al contenido de MO, pudiera

reflejar procesos de degradación de los suelos, debido principalmente a un manejo inadecuado del suelo (Borges et al. 2012). Por lo tanto, la presencia de la materia orgánica en el suelo determina la fertilidad, así también la presencia de los microorganismos y la funcionalidad del ciclo de los nutrientes en el suelo. De ello también depende la disponibilidad de los nutrientes para el aprovechamiento de las plantas (Julca-Otiniano et al. 2006). Sin embargo, los suelos ubicados en el ambiente A, son los que tienen mayor contenido de materia orgánica y son de textura más fina que los suelos B y C respectivamente. Por consiguiente, podríamos afirmar que la cantidad de MO en el suelo mejora considerablemente las condiciones físicas de un determinado suelo. Y con el tiempo podrían las características texturales cambiar.

Entre las propiedades físicas del suelo la materia orgánica (MO) es considerada como el más importante indicador de la calidad del suelo. Por consiguiente, la MO es la fracción orgánica del suelo excluyendo residuos vegetales y animales sin descomponer y su importancia radica en la relación que presenta con numerosas propiedades del suelo. Se destaca principalmente como un indicador de la fertilidad de un determinado suelo (García 2004). Dadas las condiciones de fertilidad en un determinado ambiente, predio, área de cultivo, sea cual sea el escenario de acción, el rol que juega tanto la materia orgánica como la textura de un determinado suelo. Siempre será para mejorar las condiciones de fertilidad del suelo, en beneficio de los cultivos. Por lo tanto, a mayor cantidad de materia orgánica y textura más fina se podría dar una adecuada fertilidad. Pero esta situación depende de muchas variables tanto topográficas, de paisaje, climáticos, influencia antrópica, que condicionan a los procesos de funcionalidad de los suelos.

Por consiguiente, la fertilidad de un determinado ambiente está fuertemente relacionada con la historia de uso y manejo. Pero también está relacionada con las condiciones topográficas, el relieve y el paisaje de una determinada región.

Conclusiones

El contenido de materia orgánica condiciona las características de textura de un determinado suelo podría modificarlo con el transcurrir del tiempo, siempre y cuando se den las condiciones.

La materia orgánica y la textura son las principales propiedades que definen la fertilidad del suelo en una primera instancia, sin embargo, la parte química también juega un rol muy importante.

La materia orgánica y la textura son los principales responsables y son considerados como los indicadores de la calidad de un suelo, ya que son estos fáciles de apreciar visualmente, además estas representan y constituyen la parte física de un suelo.

La influencia de la historia de uso y el manejo de un determinado ambiente está fuertemente relacionada con la fertilidad del suelo, ya que de ello depende la productividad de ese ambiente.

Agradecimientos

Mi agradecimiento al proyecto BEISA 3-IASA, dependiente de la Facultad de Ciencias Agrarias (UMRPSFXCH), por el apoyo logístico y moral en la realización de este artículo. Asimismo, agradezco a la Dra. Elke Noellemeyer (UNLPam) por la asesoraría del trabajo de posgrado.

Referencias

- Borges, J. A., M. Barrios, E. Sandoval, Y. Bastardo. & O, Márquez. 2012. Características físico-químicas del suelo y su asociación con macro elementos en áreas destinadas a pastoreo en el Estado Yaracuy. *Bioagro* 24(2): 121-126.
- Boyle, M., W. T. Frankenberger & L. H Stoltzy, 1989. The influence of organic matter on soil aggregation and water infiltration. *Journal of Prod. Agri.* 2, 290-299.
- Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method for making particle size analysis de soils. *Agronomy Journal* 54:464-465.
- Coronado, V. 2010. Riqueza, diversidad, estructura y uso de los bosques mntanos secundarios en la Micro-Cuenca Tartagalito del PN-AMI Serranía del Iñaño (Luís Calvo, Chuquisaca). Tesis de grado. Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca Sucre, Bolivia. 104.
- Camps-Arbestain, M., I. Martínez de Arano, S. Mendarte, A. Aizpurua & M. Pinto. 2004. Pautas para inducir una acumulación adicional de carbono orgánico en biomasa forestal y en suelos agrícolas y forestales de la CAPV. *Edafología* 11, 52-78.
- Dick, W. A. 1984. Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. *Soil Science Society of America Journal* 48, 569-584.
- Gartzia, N. 2009. Estructura y dinámica de la materia orgánica del suelo en ecosistemas forestales templados: de lo particular a lo general. Tesis doctoral, Universidad del País Vasco. 167.
- García, F. 2004. Agricultura sustentable y materia orgánica del suelo: siembra directa, rotaciones y fertilidad. Presentación realizada en el III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 7.
- Grayston, S. J. & C. E. Prescott. 2005. Microbial communities in the forest floors under four tree

- species in coastal British Columbia. *Soil Biology and Biochemistry* 37, 1157-1167.
- Hartwich, F., T. Arispe & M. Monge. 2007. Innovación en el Cultivo del Maní en Bolivia: Efectos de la Interacción Social y de las Capacidades de Absorción de los Pequeños Productores, International Food Policy Research Institute, Fundación Casa de Agricultura, International Food Policy Research Institute, ISNAR División, 1- 92.
- Hernando, V. 1988. La materia orgánica en la producción vegetal del secano. *Revista del Instituto Pirenaico de Ecología (Galicia)* 4: 949-954.
- Hudson, B. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation* 49, 189-194.
- IBCE – CANEB. 2007. Potencial Exportador MANÍ - Cacahuete (*Arachis hypogaea*), “Exportar con responsabilidad social, generando empleo”, Instituto Boliviano de Comercio Exterior, Cámara Nacional de Exportación de Bolivia, Publicación mensual – Año 2, junio, N° 14, 3.
- IBCE - CNDA, 2010. Panorama Nacional, Bolivia en cuarto lugar de producción de maní “Exportar con responsabilidad social, generando empleo”, Instituto Boliviano de Comercio Exterior, Cámara Nacional de Despachos de Aduana, Publicación bimestral – Año 5, marzo, N° 40, 6.
- Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation: a System of Quantitative Pedology*, foreword by Ronald Amundson, Originally published: New York: McGraw-Hill, University of California, ISBN 0-486-68128-9, 1 -191.
- Johnson, D. W. & D. E. Todd. 1998. Harvesting effects on long-term changes in the nutrient pool of mixed oak forest. *Soil Science Society of America Journal* 62, 1725–1735.
- Julca-Otiniano, A., L. Meneses-Florián, R. Blas-Sevillano & S. Bello-Amez. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *IDESA, Chile*. 24, 1. 49–61.
- MacRae, A., G. R. Mehuys., 1985. The effect of green manuring on the physical properties of temperate area soils. *Advances in Soil Science* 3, 71-94.
- Olsson, B. A., H. Lundkvist & H. Staaf. 2000. Nutrient status in needles of norway spruce and Scots pine following harvesting of logging residues. *Plant and Soil* 23, 161-173.
- Orias, J. 2014. Mapeo digital de la aptitud del suelo en San Pedro del Zapallar del PN - ANMI Serranía del Iñaño, Chuquisaca - Bolivia. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de la Pampa. Santa Rosa, La Pampa - Argentina. 88.
- Pikul, J. L. & J. F. Zuzel. 1994. Soil crusting and water infiltration affected by long-term tillage and residue management. *Soil Science Society of America Journal* 58, 1524-1530.
- Reeves, D. W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research* 43, 131-167.
- Rocabado, F. 2001. Análisis de la Cadena de Valor Agro-Alimentaria del Ají, FDTA – VALLES Fundación para el Desarrollo de Tecnología Agropecuaria Valles, Proyecto MAPA, Gobierno de Bolivia y USAID/Bolivia en apoyo a la FDTA-Valles, 1– 52.
- Six, J., R.T. Conant, E. A. Paul & K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241:155-176.
- Tan, K. H. 1996. Sample preparation. In: M. Dekker (Editor). *Soil sampling preparation and analysis*. 17-26. ASA Publishers, Madison, USA.
- Tisdall, J. M. & J. M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33, 141–163.
- USAID/Bolivia. 2009. Acceso al Mercado y Alivio a la Pobreza (Mapa): Programa del Ají, United States Agency International Development (USAID) en Bolivia: 45 años trabajando juntos para vivir mejor, <http://bolivia.usaid.gov>. Consultado 22/06/2013.
- Zou, C., R. Sands, G. Buchan & I. Hudson. 2000. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. *Australian Journal of Soil Research* 38, 947-958.