

# EFFECTOS DEL RODILLO AIREADOR Y EL FUEGO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS E HIDROLÓGICAS DEL SUELO EN MATORRALES DE COAHUILA, MÉXICO

## EFFECTS OF THE AERATOR ROLLER AND FIRE ON THE PHYSICAL AND HYDROLOGICAL PROPERTIES OF THE SOIL IN THE SCRUBLANDS OF COAHUILA, MEXICO

Romelia **Medina-Guillén**<sup>1\*</sup>, Israel **Cantú-Silva**<sup>1</sup>, Humberto **González-Rodríguez**<sup>1</sup>,  
Marisela **Pando-Moreno**<sup>1</sup>, Tetsuya **Kubota**<sup>2</sup>, Marco V. **Gómez-Meza**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Carretera Nacional 145. 67700. Linares, Nuevo León, México. (medina.romelia.10@gmail.com). <sup>2</sup>Agriculture Faculty, Kyushu University. Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581. Japan. (kubot@agr.kyushu-u.ac.jp). <sup>3</sup>Facultad de Economía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Avenida Lázaro Cárdenas 4600 Oriente. 64930. Fraccionamiento Residencial Las Torres, Monterrey, Nuevo León. (marcovgmeza@hotmail.com).

### RESUMEN

El desierto Chihuahuense es un área pastoreada desde el siglo XVI, con importancia ecológica y económica en el país, donde el sobrepastoreo ha provocado cambios en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo. Estos cambios se evaluaron en ecosistemas de matorral desértico micrófilo (MDM) y rosetófilo (MDR) en Coahuila, México. Las técnicas fueron de rehabilitación con rodillo aireador en 2004, 2008 y 2011 y de un incendio natural. La hipótesis fue que ambas promueven el incremento de la materia orgánica del suelo (MOS), la infiltración de agua y disminuyen la compactación de suelo. El diseño experimental fue bifactorial con 10 tratamientos: 1) testigos (MDMt y MDRt), 2) rodillo aireador aplicado en 2004 (MDMRA04 y MDRA04), 3) 2008 (MDMRA08 y MDRA08), 4) 2011 (MDMRA11 y MDRA11) y, 5) área incendiada 2011 (MDMIN11 y MDRIN11). Las variables analizadas fueron: agua útil (AU), coeficiente de permeabilidad, conductividad eléctrica, densidad aparente, infiltración de agua en el suelo, materia orgánica del suelo, reacción de suelo, resistencia mecánica a la penetración y textura de suelo. El análisis de varianza mostró diferencias significativas en todas las variables, excepto el porcentaje de AU, entre los cinco tratamientos en ambos tipos de vegetación. El contenido de MOS de los tratamientos RA11 e IN11 se duplicó en ambos tipos de vegetación respecto al observado en los tratamientos testigo. La permeabilidad disminuyó en los tratamientos MDMRA04,

### ABSTRACT

Since the XVI century, the Chihuahuan desert has been a grazing area. This area has ecological and economical significance for the country; however, overgrazing has caused changes in the physical and hydrological properties of the soil. These changes were evaluated on microphyllus desert scrublands (MDM) and rosette desert scrublands (MDR) in Coahuila, Mexico. The rehabilitation techniques were an aerator roller during 2004, 2008 and 2011, and natural fires. The hypothesis was that both techniques promote the increase of the soil's organic matter (MOS), water infiltration, and decrease soil compaction. A bifactorial experimental design was used which consisted of 10 treatments: 1) control (MDMt and MDRt); 2) aerator roller, applied in 2004 (MDMRA04 and MDRA04); 3) 2008 (MDMRA08 and MDRA08); 4) 2011 (MDMRA11 and MDRA11); and, 5) burned area, 2011 (MDMIN11 and MDRIN11). The following variables were analyzed: useful water (AU), coefficient of permeability, electrical conductivity, apparent density, water infiltration on the soil, soil organic matter, soil reaction, mechanical resistance to penetration, and soil texture. Five treatments were applied on both types of vegetation, and the analysis of variance showed significant differences in all the variables, except for the AU percentage. The RA11 and IN11 treatments' MOS content doubled on both types of vegetation, with regard to the content observed on the control treatments. Permeability decreased by 5, 82, 45, 48, and 12 %, on the MDMRA04, MDMRA08, MDMRA11, MDRA08, and MDRIN11 treatments, respectively, and increased by 6 and 2 % on the MDMIN11 and MDRA04 treatments, in relation to control. During the first 3 years, the aerator roller increased MOS and decreased soil compaction. Therefore,

\*Autor responsable ❖ Author for correspondence.  
Recibido: noviembre, 2016. Aprobado: febrero, 2017.  
Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 51: 471-485. 2017.

MDMRA08, MDMRA11, MDRRA08 y MDRIN11 (5, 82, 45, 48 y 12 %, respectivamente) y aumentó en el tratamiento MDMIN11 y MDRRA04, respecto al testigo en 6 y 2 %. El rodillo aireador durante los primeros tres años aumentó la MOS y redujo la compactación del suelo, por lo cual el uso de rodillo es una opción de manejo periódico en función del estado de las variables del suelo relacionadas con su uso.

**Palabras clave:** materia orgánica del suelo, matorral micrófilo y rosetófilo, compactación de suelo, permeabilidad, fuego.

## INTRODUCCIÓN

Las propiedades del suelo son susceptibles a los cambios de su uso y son indicadores de calidad de suelo (Wang *et al.*, 2012). Las propiedades físicas del suelo como densidad, distribución y tamaño de los poros, capacidad de retención de agua, contenido de agua en el suelo, capacidad de infiltración y agregación, son alteradas con facilidad (Spedding *et al.*, 2004; Bhattacharyya *et al.*, 2008; Cjpek *et al.*, 2012). Además, la materia orgánica es la más susceptible a la sobreexplotación agrícola y al fuego (Darwish *et al.*, 1995; Certini, 2005; Swędryńska *et al.*, 2013).

El cambio de uso de suelo puede alterar radicalmente la vegetación aun en lapsos de tiempo breves (Huang *et al.*, 2006), porque la vegetación mejora las propiedades físicas, químicas y microbianas del suelo mediante la reducción de la densidad aparente, el incremento de nutrientes, la tasa de infiltración, retención de agua y la biomasa vegetal (Jia *et al.*, 2011). La reducción de la capacidad del suelo para almacenar agua disponible es el factor que más contribuye a la pérdida de la productividad del suelo debido a la erosión (Rasoulzadeh y Yaghoubi, 2014). Los factores edáficos como el pH, los niveles de nutrientes y la calidad y cantidad de materia orgánica (MOS) cambian con la profundidad (Rumpel y Kögel-Knabner, 2011; Eilers *et al.*, 2012). La MOS del suelo es uno de los principales factores que afectan otras propiedades del suelo (Murray *et al.*, 2014) y sus funciones, incluyendo la retención de agua (Carter, 2002), la infiltración de aire, agua (Hillel, 2004; Li *et al.*, 2007) y la estabilidad de agregados (Six *et al.*, 2004), modifican la porosidad y capacidad de agua disponible que puede mejorar el desarrollo de las raíces, estimula el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los

using the aerator roller is a periodic management option depending on the soil variables' state, in relation with its use.

**Key words:** soil organic matter, microphyllus and rosette desert scrublands, soil compaction, permeability, fire.

## INTRODUCTION

The soil properties are susceptible to changes in land use and are indicators of the soil quality (Wang *et al.*, 2012). The soil physical qualities such as density, pore distribution and size, water retention capacity, water content in soil, infiltration, and aggregation capacity, are easily altered (Spedding *et al.*, 2004; Bhattacharyya *et al.*, 2008; Cjpek *et al.*, 2012). In addition, the organic matter is highly susceptible to agricultural overexploitation and fire (Darwish *et al.*, 1995; Certini, 2005; Swędryńska *et al.*, 2013).

Changes in land use can dramatically alter the vegetation, even for brief periods (Huang *et al.*, 2006), because the vegetation enhances the soil's physical, chemical, and microbial properties, through the decrease of apparent density, and the increase of nutrients, infiltration rates, water retention, and plant biomass (Jia *et al.*, 2011). As a result of erosion, the reduction of the soil capacity to store available water is the factor that most contributes to soil productivity loss (Rasoulzadeh and Yaghoubi, 2014). The edaphic factors, such as pH, nutrient levels, quality and quantity of the organic matter (MOS), change with depth (Rumpel and Kögel-Knabner, 2011; Eilers *et al.*, 2012). Soil MOS is one of the main factors that affect other soil properties (Murray *et al.*, 2014) and its functions, including water retention (Carter, 2002), air and water infiltration (Hillel, 2004; Li *et al.*, 2007), and stability of aggregates (Six *et al.*, 2004); it also modifies the porosity and available water capacity which can enhance root development, stimulates plant growth and crop yield, directly or indirectly replacing nutrients (Darwish *et al.*, 1995), and reduces erosion (Li *et al.*, 2007).

The disturbed ecosystems tend to decompose (Montaño-Arias *et al.*, 2006); this affects the ecosystem operation, due to the alteration of its nutrients circulation dynamic, primary productivity, and water flow and retention (Maass, 1998). Fire causes significant physical and chemical

cultivos directa o indirectamente supliendo nutrientes (Darwish *et al.*, 1995) y reduce la erosión (Li *et al.*, 2007).

Los ecosistemas perturbados tienden a degradarse (Montaño-Arias *et al.*, 2006), lo cual afecta el funcionamiento del ecosistema al alterar la dinámica de la circulación de nutrimentos, la productividad primaria y el flujo y retención de agua (Maass, 1998). El fuego causa cambios físicos y químicos significativos como pérdida de la cobertura vegetal, desarrollo de hidrofobicidad de suelo, pérdida de permeabilidad (Cyzdik y Hougue, 2009). Estos efectos sobre las propiedades del suelo dependen de su intensidad y duración (Cetrini, 2005). El fuego tiene mayor impacto sobre la MOS, la cual puede sufrir desde una ligera volatilización de componentes menores, hasta la carbonización o la oxidación completa (Certini, 2005).

Desde hace décadas se realizan investigaciones y se desarrollan técnicas para manejar especies de plantas arbustivas para que los pastizales vuelvan a la condición de clímax y mejorar la productividad de los agostaderos (Anaya y Barral, 1995; Molinar-Holguín *et al.*, 1998; Casanova *et al.*, 2007). La Sierra Maderas del Carmen, al norte de Coahuila, tiene un largo historial de uso ganadero (INE-SEMARNAT, 1997) lo cual ha favorecido la compactación de suelo y cambios en la estructura de la vegetación dentro del matorral desértico micrófilo y rosetófilo. En la zona se implementaron proyectos de mejoramiento de hábitat mediante tratamientos mecánicos, pero se enfocaron en evaluar los beneficios sobre la vegetación (Casas y Manzano 2009; Ayala *et al.*, 2014; Medina *et al.*, 2016) y no en otros componentes del ecosistema. El objetivo principal de nuestro estudio fue evaluar los cambios en algunas propiedades hidroedafológicas en áreas con ocurrencia de fuego de origen no humano, y áreas sometidas a tratamiento mecánico de rodillo aireador y conocer los efectos que provee cada tratamiento al suelo. La hipótesis fue que el efecto del fuego y del rodillo aireador aumentará la MOS y la permeabilidad, así como una reducción de la densidad aparente.

## MATERIALES Y MÉTODOS

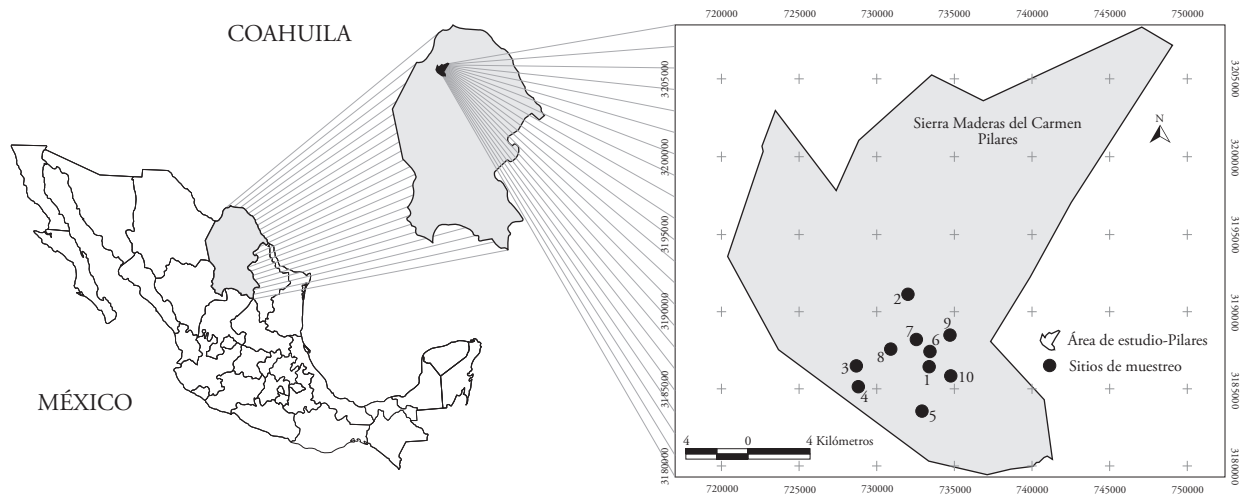
El área de estudio se ubicó en los planos desérticos de la Sierra Maderas del Carmen al norte de Coahuila, dentro de el área de conservación privada Los Pilares (McKinney *et al.*,

changes —such as loss of vegetation cover, soil hydrophobicity development, and permeability loss (Cyzdik and Hougue, 2009). These effects on the soil properties depend on its intensity and duration (Cetrini, 2005). Fire has the highest impact on MOS, from a light volatilization of minor components, up to carbonization or complete oxidation (Certini, 2005).

For decades, researchers have carried out experiments and developed management systems of shrub species in order to return pastures to their climax condition and to improve the productivity of the rangelands, (Anaya and Barral, 1995; Molinar-Holguín *et al.*, 1998; Casanova *et al.*, 2007). Sierra Maderas del Carmen, located in northern Coahuila, has a long history of cattle grazing (INE-SEMARNAT, 1997), which has favored soil compaction and changes in the vegetation structure of the microphyllus and rosette desert scrublands. In this zone, enhancement projects were implemented through mechanical treatments; however, these projects focused on the evaluation of the benefits for vegetation (Casas and Manzano, 2009; Ayala *et al.*, 2014; Medina *et al.*, 2016), and not for other ecosystem components. The main objective of our study was to evaluate the changes on some hydrological and edaphic properties in areas where wildfires took place, as well as the areas where mechanical treatments were carried out —using an aerator roller—, in order to find out the effects that each treatment has on the soil. The hypothesis was that the effect of fire and of the aerator roller will increase MOS and permeability, as well as decrease apparent density.

## MATERIALS AND METHODS

The study was carried out in the desert lands of Sierra Maderas del Carmen, in northern Coahuila, within Los Pilares—a private conservation area— (McKinney *et al.*, 2006) (Figure 1), between 29° 22.45' and 28° 42.21' N, 102° 56.23' and 102° 21.08' W, at an altitude of 1182 m. The annual average precipitation is 237.4 mm and the annual average temperature is 21.5 °C. The predominant soils are calcium kastanozems, rendzinas, chromic vertisols, and calcareous litosols and reghosols (SPP 1982a; 1982b; 1983). The vegetation types include: oak (*Quercus*), pine (*Pinus*), and oyamel (*Abies*) woodland; submontane scrublands, zacatales, and the Chihuahuan desert scrublands, which include the microphyllus and rosette desert scrublands, gypsophila and halophilous communities (INE-SEMARNAT, 1997). The



**Figura 1. Localización del área de estudio.**  
**Figure 1. Location of the study area.**

2006) (Figura 1), entre 29° 22.45' y 28° 42.21' N, 102° 56.23' y 102° 21.08' O, a una altitud de 1182 m. El promedio anual de precipitación es 237.4 mm y de temperatura es 21.5 °C. Los suelos predominantes son castañozems cálcicos, rendzinas, vertisoles crómicos, litosoles y regosoles calcáricos (SPP 1982a; 1982b; 1983). Los tipos de vegetación incluyen bosques de encino (*Quercus*), pino (*Pinus*) y oyamel (*Abies*); matorral submontano, zacatal y matorral desértico chihuahuense; que incluye los matorrales micrófilo, rosetófilo, comunidades gipsófilas y halófilas (INE-SEMARNAP, 1997). Las parcelas experimentales se ubicaron en el matorral desértico micrófilo y rosetófilo.

En la primavera de 2014 se definieron cinco tratamientos dentro del matorral desértico micrófilo y cinco en el matorral desértico rosetófilo en un mismo tipo de suelo: regosol calcárico, con pendiente menor a 5°. El diseño experimental fue bifactorial, con 10 tratamientos: 1) testigo (MDMt), 2) rodillo aireador aplicado en 2004 (RA04), 3) rodillo aplicado en 2008 (RA08), 4) rodillo implementado en 2011 (RA11) y, 5) área incendiada en 2011 (IN11). En cada tratamiento se estableció una parcela geo-referenciada con una superficie de 1024 m<sup>2</sup> (32 m × 32 m) para tomar muestras de suelo (Estrada-Castillón *et al.*, 2014; Medina *et al.*, 2016). En cada parcela se obtuvieron cuatro muestras de suelo de 1.5 kg a una profundidad de 0-30 cm para el análisis de propiedades físicoquímicas en laboratorio (DOF, 2002); además, se recolectaron cuatro muestras sin disturbio para determinar el coeficiente de permeabilidad (K) de suelo usando el método del JIS (Das, 1997). También se obtuvieron muestras de suelo para determinar su densidad aparente (DA) por el método del cilindro (Pennock *et al.*, 2008). Para los análisis de permeabilidad y DA se obtuvieron muestras a dos profundidades (0 a 10 cm, y 10 a 20 cm).

experimental plots were located in microphyllus and rosette desert scrublands.

In the spring of 2014, five treatments were defined within the microphyllus desert scrublands and five within the rosette desert scrublands. They all had the same soil type (calcareous reghoso), and a slope lower than 5°. A bifactorial experimental design was used which consisted of 10 treatments: 1) control (MDMt); 2) aerator roller, applied in 2004 (RA04); 3) roller, applied in 2008 (RA08); 4) roller, applied in 2011 (RA11); and, 5) burned area, 2011 (IN11). Samples were taken from a 1024 m<sup>2</sup> (32 m × 32 m) georeferenced plot which was established for each treatment (Estrada-Castillón *et al.*, 2014; Medina *et al.*, 2016). Four 1.5 kgs samples were obtained from each plot, at a 0-30 cm depth; they were subsequently analyzed in the lab, to find out their physicochemical properties (DOF, 2002). We also collected four undisturbed samples, in order to determine the soil's coefficient of permeability (K), using the JIS method (Das, 1997). In addition, we took soil samples to determine its apparent density (DA), using the cylinder method (Pennock *et al.*, 2008). Samples were taken at two different depths—0 to 10 cm and 10 to 20 cm—to carry out a permeability and DA analysis.

The following analysis were carried out in the laboratory: organic matter (MOS) content, using the AS-07-NOM-021-REC-NAT-2000 method, Walkley/Black (DOF, 2002); soil reaction (pH), using the AS-23-NOM-021-REC-NAT-2000 method (DOF, 2002); electrical conductivity (CE) from the saturation extract, using the AS-18 NOM-021 REC-NAT-2000 method (DOF, 2002); soil texture, using the AS-09 NOM-021 REC-NAT-2000 method, Bouyoucos densimeter (DOF, 2002); soil infiltration, using the double ring infiltrometer; mechanical resistance to penetration (RMP), using the Yamanaka soil

Los análisis en laboratorio fueron: contenido de materia orgánica (MOS) con el método AS-07-NOM-021-REC-NAT-2000, Walkley/Black (DOF, 2002), reacción de suelo (pH) con el método AS-23-NOM-021-REC-NAT-2000 (DOF, 2002), conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación con el método AS-18 NOM-021 REC-NAT-2000 (DOF, 2002), textura de suelo con el método AS-09 NOM-021 REC-NAT-2000, densímetro de Bouyoucos (DOF, 2002), la infiltración de suelo con el método del infiltrómetro de doble cilindro y la resistencia mecánica a la penetración (RMP) con el *soil hardness tester* Yamanaka (Carrasco *et al.*, 2012), la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente con el método de la olla de presión (López-Ritas, 1967) utilizados para determinar el porcentaje de agua útil.

Los análisis estadísticos se realizaron en el programa SPSS®, versión estándar 22 para Windows (SPSS Inc., Chicago, IL.). Para probar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas para las variables analizadas los datos se sometieron a la prueba de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors (Gómez *et al.*, 2003). Las variables se transformaron para inducir a la distribución normal: los valores de CE se transformaron a cuadrado del inverso, el porcentaje de MOS se transformó a arcoseno raíz cuadrada de la proporción, los valores de K se transformaron a raíz cuadrada del inverso, los de pH se elevaron a la décima potencia, mientras que los de infiltración acumulada (IAC) y RMP fueron transformados a logaritmo (McCune y Grace, 2002).

Para conocer la relación entre las variables se determinó el coeficiente de correlación de Spearman (Lahura, 2003), el AN-DEVA se usó para detectar diferencias significativas entre los tratamientos (Ott, 2001) y la comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para apoyar la credibilidad de la tasa de error (Walpole *et al.*, 1999).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La textura en todos los tratamientos se clasificó como suelos franco-arcillosos, con 60-80 % arcilla, 20-45 % arena y 20-50 % limo.

El coeficiente de Spearman mostró correlación negativa significativa entre la densidad aparente, la CE (-0.476) y la MOS (-0.537), y una correlación positiva significativa entre la densidad aparente y el pH (0.409). La correlación de CE fue significativa positiva con el MOS (0.701) y con el agua útil (0.305), pero con el pH (-0.401) fue negativa. La MOS presentó una correlación significativa negativa con el pH (-0.292) y una positiva con el agua útil (0.235) (Cuadro 1).

hardness tester (Carrasco *et al.*, 2012); field capacity and the permanent wilting point, using the pressure cooker method (López-Ritas, 1967). These methods were used to determine the useful water percentage.

The statistical analysis was carried out using the SPSS® program, standard version 22 for Windows (SPSS Inc. Chicago, IL.). In order to prove the variances' normality and homogeneity assumptions for the analyzed variables, the data was studied using the Lilliefors modification of the Kolmogorov-Smirnov test (Gómez *et al.*, 2003). The variables were transformed to induce a normal distribution: the CE values were transformed into the inverse square; the MOS percentage was transformed into an arcsine square root of the proportion; the K values were transformed into an inverse square root; the pH values were raised to the power of ten, while the cumulative infiltration (IAC) and the RMP values were transformed into logarithms (McCune and Grace, 2002).

We determined the Spearman's correlation coefficient to find out the relation between variables (Lahura, 2003); we used ANOVA to detect significant differences between treatments (Ott, 2001); and we compared means using the Tukey test ( $p \leq 0.05$ ), to support the error rate credibility (Walpole *et al.*, 1999).

## RESULTS AND DISCUSSION

For all treatments, soil texture was classified as clay loam soil, with 60-80 % clay, 20-45 % sand, and 20-50 % silt.

Spearman's coefficient showed a significant negative correlation between apparent density, CE (-0.476), and MOS (-0.537), and a significant positive correlation between apparent density and pH (0.409). CE showed a significant positive correlation with MOS (0.701) and useful water (0.305), but it showed a negative correlation with pH (-0.401). MOS showed a significant negative correlation with pH (-0.292) and a positive correlation with useful water (0.235) (Table 1).

For the treatments' average, the Spearman's coefficient showed that DA had significant positive correlation with pH (0.636) and mechanical resistance to penetration (0.661), but it had a negative correlation with CE (-0.891) and MOS (-0.867). CE showed significant positive correlation with MOS (0.794) and negative correlation with RMP (-0.867), while pH showed a significant correlation with AU (-0.770) (Table 2).



**Cuadro 1. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables estudiadas.**  
**Table 1. Spearman's correlation coefficients for the variables under study.**

	DA	CE	MOS	pH	K	AU
Densidad aparente DA (g cm <sup>-3</sup> )	1	.001	.001	.001	.602	.210
Conductividad eléctrica CE (μS s <sup>-1</sup> )	-.476**	1	.001	.001	.199	.006
Materia orgánica MOS (%)	-.537**	.701**	1	.009	.372	.036
Reacción de suelo pH	.409**	-.401**	-.292**	1	.860	.161
Permeabilidad K (cm s <sup>-1</sup> )	-.059	.145	.101	.020	1	.319
Agua útil AU (%)	-.142	.305**	.235*	-.158	.113	1

†Triangular inferior y valores de *p* bilaterales en la triangular superior (n=80). ‡DA: densidad aparente; CE: conductividad eléctrica; MOS: materia orgánica; pH: reacción del suelo; K: permeabilidad; AU: agua útil ❖ †Lower triangular and bilateral *p* values in the upper triangular (n=80). ‡DA: apparent density; CE: electrical conductivity; MOS: soil organic matter; pH: soil reaction; K: permeability; AU: useful water.

Para los promedios de los tratamientos el coeficiente de Spearman mostró que la correlación significativa de DA fue positiva con el pH (0.636) y la resistencia mecánica a la penetración (0.661), pero fue negativa con la CE (-0.891) y la MOS (-0.867). La CE mostró correlación significativa positiva con MOS (0.794) y negativa con pH (-0.685) y RMP (-0.867), mientras que el pH tuvo correlación negativa significativa con AU (-0.770) (Cuadro 2).

El análisis de varianza (Cuadro 3) indicó que para el modelo y el tratamiento todas las variables presentaron diferencias significativas, excepto el porcentaje de AU (p=0.108). Para el factor vegetación (FA<sup>a</sup>) las variables con diferencias significativas fueron la CE (p=0.006), la MOS (p=0.007) y el pH (p=0.001), y para el factor de los tratamientos rodillo e incendio (FB<sup>b</sup>) todas las variables presentaron diferencias significativas. La interacción entre la vegetación

The analysis of variance (Table 3) indicated that with regard to model and treatment all variables showed significant differences, except AU percentage (p=0.108). With regard to the vegetation factor (FA<sup>a</sup>), the following variables showed significant differences: CE (p=0.006), MOS (p=0.007), and pH (p=0.001); meanwhile, with regard to the roller and fire treatment factors (FB<sup>b</sup>), all variables showed significant differences. The vegetation-treatment interaction (FA\*FB) was significant for MOS (p=0.005), permeability (p=0.012), pH (p=0.031), and cumulative infiltration (p=0.001), while depth only showed significant differences for MOS (p=0.049) and pH (p=0.031).

The habitat enhancement methods (RA and IN) implemented in the rosette desert scrublands diminished soil apparent density (12-20 % in relation to control, with RA11 and IN11 treatments). When

**Cuadro 2. Coeficientes de correlación de Spearman para los promedios de los tratamientos en las variables estudiadas.**  
**Table 2. Spearman's correlation coefficients for the treatments' averages of the variables under study.**

	DA	CE	MOS %	pH	K	AU %	I Ac	RMP
Densidad aparente DA (g cm <sup>-3</sup> )	1	.001	.001	.048	.651	.276	.803	.038
Conductividad eléctrica CE (μS s <sup>-1</sup> )	-.891**	1	.006	.029	.777	.060	.829	.001
Materia orgánica MOS (%)	-.867**	.794**	1	.138	.934	.276	.777	.090
Reacción de suelo pH	.636*	-.685*	-.503	1	.651	.009	.855	.090
Permeabilidad K (cm s <sup>-1</sup> )	.164	-.103	-.030	.164	1	.829	.489	.855
Agua útil AU (%)	-.382	.612	.382	-.770**	.079	1	.603	.108
Infiltración acumulada I Ac (cm h <sup>-1</sup> )	-.091	.079	.103	.067	.248	-.188	1	.803
Resistencia mecánica a la penetración RMP (kg cm <sup>-2</sup> )	.661*	-.867**	-.564	.564	-.067	-.539	-.091	1

†Triangular inferior y valores de *p* bilaterales en la triangular superior (n=10). ‡Significancia ❖ †Lower triangular and bilateral *p* values in the upper triangular (n=10). ‡Significance.

**Cuadro 3. Análisis de varianza para el modelo con dos criterios de clasificación, (Tratamiento y Profundidad o Tratamiento y Estación).**  
**Table 3. Analysis of variance for the two-criteria classification model (Treatment and Depth or Treatment and Season).**

Variable	Modelo	Tratamiento	FA <sup>(a)</sup>	FB <sup>(b)</sup>	FA*FB	Profundidad	Prueba de falta de ajuste	Prueba de Levene <sup>(c)</sup>	R <sup>2</sup> ajustado
	F <sub>(10, 69)</sub>	F <sub>(9, 69)</sub>	F <sub>(1, 69)</sub>	F <sub>(4, 69)</sub>	F <sub>(4, 69)</sub>	F <sub>(1, 69)</sub>	F <sub>(9, 60)</sub>	F <sub>(19, 60)</sub>	
DA (g cm <sup>-3</sup> ) t <sup>(d)</sup>	5.13 (.001)	5.68 (.001)	2.78 (.100)	9.89 (.001)	2.20 (.078)	0.13 (.722)	0.34 (.958)	0.84 (.649)	34.31
CE (μS s <sup>-1</sup> ) t <sup>(d)</sup>	11.10 (.001)	12.27 (.001)	8.12 (.006)	24.43 (.001)	1.16 (.338)	0.55 (.460)	0.82 (.604)	1.57 (.095)	56.12
MOS (%) t <sup>(d)</sup>	10.36 (.001)	11.06 (.001)	7.77 (.007)	18.92 (.001)	4.03 (.005)	4.01 (.049)	1.38 (.218)	1.57 (.096)	54.22
K (cm s <sup>-1</sup> ) t <sup>(d)</sup>	5.77 (.001)	6.40 (.001)	0.01 (.996)	10.91 (.001)	3.49 (.012)	0.15 (.697)	.088 (.999)	3.17 (.001)	37.67
pH t <sup>(d)</sup>	20.54 (.001)	22.29 (.001)	39.27 (.001)	24.54 (.001)	15.80 (.001)	4.82 (.031)	0.53 (.850)	2.84 (.001)	71.21
AU (%) <sup>(d)</sup>	1.66 (.108)	1.85 (.075)	0.01 (.979)	3.86 (.007)	0.29 (.883)	0.01 (.943)	1.29 (.259)	.49 (.957)	7.73
	Estación								
	F <sub>(11, 78)</sub>	F <sub>(9, 78)</sub>	F <sub>(1, 78)</sub>	F <sub>(4, 78)</sub>	F <sub>(4, 78)</sub>	F <sub>(2, 78)</sub>	F <sub>(9, 60)</sub>	F <sub>(29, 60)</sub>	
IAC (cm h <sup>-1</sup> ) t <sup>(d)</sup>	16.01 (.001)	19.16 (.001)	0.72 (.399)	27.97 (.001)	14.96 (.001)	1.82 (.169)	1.77 (.051)	1.18 (.288)	64.97
	Estación								
	F <sub>(12, 27)</sub>	F <sub>(9, 27)</sub>	F <sub>(1, 27)</sub>	F <sub>(4, 27)</sub>	F <sub>(4, 27)</sub>	F <sub>(3, 27)</sub>	F <sub>(9, 30)</sub>	F <sub>(9, 30)</sub>	
RMP (kg cm <sup>-2</sup> ) t <sup>(d)</sup>	5.89 (.001)	7.66 (.001)	1.39 (.248)	14.28 (.001)	2.62 (.057)	0.55 (.653)		1.49 (.197)	60.05

<sup>†</sup>DA: Densidad aparente; CE: Conductividad eléctrica; MOS: Materia orgánica; K: Permeabilidad; pH: Reacción de suelo; AU: Agua útil; IAC: Infiltración acumulada; RMP: Resistencia mecánica a la penetración \* <sup>†</sup>DA: apparent density; CE: electrical conductivity; MOS: organic matter; K: permeability; pH: soil reaction; AU: useful water; IAC: cumulative infiltration; RMP: mechanical resistance to penetration.

y los tratamientos (FA\*FB) fue significativa para MOS ( $p=0.005$ ), permeabilidad ( $p=0.012$ ), pH ( $p=0.031$ ) y la infiltración acumulada ( $p=0.001$ ), mientras que la profundidad sólo mostró diferencias significativas para MOS ( $p=0.049$ ) y pH ( $p=0.031$ ).

Los métodos de mejoramiento del hábitat implementados (RA e IN) en el matorral desértico rosetófilo disminuyeron la densidad aparente del suelo; en los tratamientos RA11 e IN11 el decremento fue 12 a 20 % respecto al testigo. En el tratamiento RA11 del matorral desértico micrófilo la densidad aparente disminuyó 6 % respecto al testigo, lo cual coincide con el reportado por Anriquez *et al.* (2005) de que la DA fue menor al implementar el tratamiento de rodillo en ecosistemas semiáridos en el Chaco occidental en Argentina. Estos resultados son similares a los de Nandapure *et al.* (2011), quienes evaluaron los efectos a largo plazo del manejo integrado de nutrientes en las propiedades físicas del suelo vertisol en Ankola, India y a los de un estudio en China (Pei *et al.*, 2008) sobre los cambios en las propiedades del suelo y la vegetación en áreas de pastoreo y exclusión, en el cual la DA fue sensible a los cambios en el manejo del área.

Los resultados indican que en los primeros tres años de establecido el tratamiento de rodillo aireador la MOS y la CE aumentan, mientras disminuye la RMP, la IAc y el pH. Aunque los valores de MOS, K, pH y CE presentaron diferencias significativas entre tratamientos, en la clasificación de suelo de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, los valores están en la misma categoría, por lo que debemos aceptar que no existen diferencias significativas debido al efecto de los tratamientos. La MOS y la DA fueron las únicas variables que presentaron diferencias estadísticas y se ubicaron en otra clasificación dentro de la Norma (Cuadro 4). Las variables pH y CE no presentan cambios de categoría de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, resultados que concuerdan con los obtenidos por Silva-Arredondo *et al.* (2013) cuando analizaron los cambios en las propiedades químicas del suelo impactado por la agricultura intensiva en el noreste de México; además, enfatiza la importancia de considerar las clasificaciones con el objetivo de detectar cambios que pueden ser relevantes para los propósitos de manejo.

Rusan *et al.* (2007) evaluaron los efectos sobre las variables de calidad de suelo y planta a largo plazo

mycophyllus desert scrublands were treated with RA11, apparent density diminished 6 % in relation to control, which matches the findings of Anriquez *et al.* (2005) about the DA reduction when a roller treatment was implemented in semi-arid ecosystems at Western Chaco, Argentina. These results are similar to those of Nandapure *et al.* (2011), who evaluated the long-term effects of integrated nutrient management on the physical properties of vertisol in Ankola, India; as well as to a Chinese study (Pei *et al.*, 2008) about the changes in soil and vegetation properties in grazing and exclusion areas, in which DA was susceptible to management changes in the area.

The results indicate that during the first three years of the aerator roller treatment MOS and CE increase, while RMP, IAc, and pH decrease. Although MOS, K, pH, and CE values showed significant differences between treatments—according to the soil classification included in the Official Mexican Standard NOM-021-SEMARNAT-2000—, the values belong to the same category; therefore, we must accept that there are no significant differences as a result of the treatments. MOS and DA were the only variables that showed statistical differences, and—according to the Standard—they belong to another classification (Table 4). According to NOM-021-SEMARNAT-2000, pH and CE variables do not show category changes; these results match those obtained by Silva-Arredondo *et al.* (2013) who analyzed the changes in the chemical properties of soil that has been impacted by intensive farming in northeastern Mexico; they also emphasized the importance of taking classifications into consideration, in order to detect changes that might be relevant for management purposes.

Rusan *et al.* (2007) evaluated the long-term effects on soil and plant soil quality variables in the irrigation of crops with wastewater, and found out that pH, Cu, Zn, Fe, and Mn concentrations did not change. Our study is similar, since pH did not change enough to involve two different categories in the standard used in the laboratory. Our results show that using a mechanical treatment (*i.e.*, the aerator roller) is a feasible short-term alternative that increases permeability and organic matter in the soil, since the former shows a significant increase in the variable's value in the rosette desert scrublands. However, after 8-10 years (2004 and



**Cuadro 4. Clasificación NOM-021-SEMARNAT-2000.**

**Table 4. NOM-021-SEMARNAT-2000 Classification.**

Variable	Matorral Desértico Micrófilo					Matorral Desértico Rosetófilo				
	Testigo	RA04	RA08	RA11	IN11	Testigo	RA04	RA08	RA11	IN11
DA (g cm <sup>-3</sup> )	B	M	B	MB	M	M	M	B	M	MB
CE (μS s <sup>-1</sup> )				Efectos depreciables de la salinidad						
MOS (%)	M	B	B	A	A	B	M	B	M	A
pH	Medianamente alcalino									

†Clasificación para MOS y DA: MB: Muy bajo; B: Bajo; M: Medio; A: Alto ❖ †MOS and DA classification: MB: very low; B: low; M: medium; A: high.

en la irrigación de cultivos con aguas residuales y las concentraciones de pH, Cu, Zn, Fe y Mn no presentaron cambios. Nuestro estudio es similar a lo anterior porque el pH no cambió lo suficiente para involucrar dos categorías diferentes en la norma utilizada en laboratorio. Los resultados muestran que el uso del tratamiento mecánico de rodillo aireador es una alternativa viable para incrementar la permeabilidad y la materia orgánica del suelo solo a corto plazo, ya que la primera mostró aumento significativo en el valor de la variable en el matorral desértico rosetófilo. Sin embargo, después de 8 a 10 años (tratamientos de 2004 y 2008), MOS e IAc disminuyen, al tiempo que aumentan DA y pH.

Según la prueba de Tukey (p≤0.05) la densidad aparente del suelo mostró dos grupos y un subgrupo (Cuadro 5). Los tratamientos MDMRA11 (1.00 g cm<sup>-3</sup>) y MDRIN11 (1.01 g cm<sup>-3</sup>) se ubican en el grupo con menor compactación de suelo (grupo *a*), en una clasificación de muy baja. Los tratamientos MDRt (1.26 g cm<sup>-3</sup>), MDRRA04 (1.25 g cm<sup>-3</sup>), MDRRA08 (1.20 g cm<sup>-3</sup>) y MDMRA08 (1.19 g cm<sup>-3</sup>) están en el grupo con las medias más altas, es decir fueron los tratamientos con mayor compactación de suelo (grupo *b*). El tratamiento MDMRA11 mostró la densidad aparente más baja, lo cual se atribuye a la “reciente” remoción del suelo por acción de las cuchillas del rodillo aireador y a las coberturas inducidas por éste (Medina *et al.*, 2016). Este resultado es similar al obtenido por (Lozano *et al.*, 2010) en su estudio de los efectos de los cultivos de cobertura y el pastoreo sobre las propiedades físicas del suelo en una sabana, en la cual las menores densidades de suelo ocurrieron en las coberturas inducidas, lo cual se atribuyó a una mayor cobertura del suelo.

2008 treatments), MOS and IAc diminished, while DA and pH increased.

According to the Tukey test (p≤0.05) applied to the soil apparent density, there are two groups and one subgroup (Table 5). The MDMRA11 (1.00 g cm<sup>-3</sup>) and MDRIN11 (1.01 g cm<sup>-3</sup>) treatments are included in the group with the lowest soil compaction (group *a*), which has a very low classification. The MDRt (1.26 g cm<sup>-3</sup>), MDRRA04 (1.25 g cm<sup>-3</sup>), MDRRA08 (1.20 g cm<sup>-3</sup>), and MDMRA08 (1.19 g cm<sup>-3</sup>) treatments are included in the group with the highest soil compaction (group *b*). The MDMRA11 treatment showed the lowest apparent density, which may be the result of the “recent” soil removal caused by the blades of the aerator roller and the cover that it induces (Medina *et al.*, 2016). This result is similar to the one obtained by Lozano *et al.* (2010) —who studied the effects of cover crops and grazing on the physical properties of savannah soil—: lower soil densities occurred in induced covers, which may be the result of a greater soil cover.

CE showed two clearly defined groups and four subgroups: group *a* included the MDMRA11 treatment (137.3 μS s<sup>-1</sup>) with the highest CE, and group *d* included the MDMRA04 (56.3 μS s<sup>-1</sup>), MDRt (56.2 μS s<sup>-1</sup>), and MDRRA04 (55.9 μS s<sup>-1</sup>) treatments with the lowest CE. MOS showed two clearly defined groups and four subgroups: group *a* included the MDRt treatment (1.31 %) with the lowest MOS content, and group *d* included the MDMRA11 (3.96 %) and MDMIN11 (3.73 %) treatments with the highest MOS percentage. Soil management practices affect soil quality, nutrient quality, and chemical properties (Lauber *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014). Additionally, Velasquez *et al.* (2007) studied soil quality indicators

**Cuadro 5. Medias por tratamiento y resultado de la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).  
Table 5. Means by treatment and results of Tukey test ( $p \leq 0.05$ ).**

Variable ↓	Tratamiento (nivel de factor A, nivel del factor B)									
	MDMt	MDMRA04	MDMRA08	MDMRA11	MDMIN11	MDRt	MDRRA04	MDRRA08	MDRRA11	MDRIN11
	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(1, 4)	(1, 5)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)	(2, 4)	(2, 5)
DA ( $g\ cm^{-3}$ )	1.171	1.173	1.193	1.002	1.097	1.265	1.255	1.201	1.108	1.010
R. P. Tukey	ab	ab	b	a	ab	b	b	b	ab	a
CE ( $\mu S\ s^{-1}$ )	67.295	56.254	58.667	137.313	79.621	56.179	55.892	60.263	91.308	70.338
R. P. Tukey	bcd	d	cd	a	bc	d	d	cd	ab	bcd
MOS (%)	2.947	1.333	1.485	3.960	3.729	1.312	1.844	1.361	2.831	3.128
R. P. Tukey	cd	ab	ab	d	d	a	abc	ab	bcd	cd
pH	7.559	7.662	7.561	7.431	7.617	7.571	7.728	7.608	7.479	7.408
R. P. Tukey	abc	cd	abc	ab	bcd	abcd	d	abcd	ab	a
K ( $cm\ s^{-1}$ )	.0039	.0038	.0007	.0021	.0042	.0046	.0047	.0028	.2982	.0040
R. P. Tukey	b	b	c	b	b	b	b	b	a	b
AGUA ÚTIL (%)	15.139	8.744	12.398	16.398	12.120	12.998	10.161	11.319	17.755	12.396
R. P. Tukey	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
IAc ( $cm\ h^{-1}$ )	327.11	228.56	112.56	109.22	396.44	253.33	119.67	254.89	185.89	326.11
R. P. Tukey	de	cd	ab	a	e	cde	ab	cde	bc	de
RMP ( $kg\ cm^{-2}$ )	6.69	6.97	5.11	3.64	3.23	5.26	7.19	4.56	2.19	4.31
R. P. Tukey	cd	cd	bcd	abc	ab	bcd	d	bcd	a	bcd

† Medias con distinta letra en un renglón son estadísticamente diferentes (Tukey  $p \leq 0.05$ ) ❖ ‡ Averages with different letters in a row are statistically different (Tukey  $p \leq 0.05$ ).

La CE presentó dos grupos definidos y cuatro subgrupos: el grupo *a* incluyó el tratamiento MDMRA11 ( $137.3 \mu\text{S s}^{-1}$ ) con la CE más elevada, y el grupo *d* incluyó los tratamientos MD-MRA04 ( $56.3 \mu\text{S s}^{-1}$ ), MDRt ( $56.2 \mu\text{S s}^{-1}$ ) y MDRRA04 ( $55.9 \mu\text{S s}^{-1}$ ) con la menor CE. La MOS mostró dos grupos definidos y cuatro subgrupos: el grupo *a* incluyó el tratamiento MDRt (1.31 %) con el menor contenido de MOS y el grupo *d* incluyó los tratamientos MDMRA11 (3.96 %) y MDMIN11 (3.73 %) con el mayor porcentaje de MOS. Las prácticas de manejo afectan la calidad del suelo, la dinámica de nutrientes y las propiedades químicas (Lauber *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014). Además, Velasquez *et al.* (2007) estudiaron indicadores de calidad de suelo en Colombia y muestran que la MOS es una variable que indica la calidad y el aprovechamiento de carbono secuestrado en el suelo porque en suelos erosionados tiende a disminuir la cantidad de MOS dependiendo de las prácticas de uso del suelo. El mayor porcentaje de MOS se observó en los tratamientos MDRRA11 y MDRIN11, lo cual se atribuye al aporte de materia vegetal al suelo por acción del rodillo y no por la cobertura vegetal y la densidad arbustiva. Este resultado se asemeja al obtenido por Demuner-Molina *et al.* (2014) al evaluar el efecto de labranza y mejoradores de suelo en humedad y desarrollo radicular y muestran un mejor rendimiento de cultivo debido a los mejoradores los cuales actúan como fertilizantes orgánicos. En contraste, Montaña-Arias *et al.* (2006) determinaron que los bajos contenidos de MOS se deben a la presencia limitada de vegetación arbustiva.

*Larrea tridentata* favorece islas de fertilidad y acumula bajo su dosel mayor concentración de nutrientes, capacidad para retener agua y actividad microbiana (Celaya y Castellanos, 2011), lo cual pudiera explicar los resultados obtenidos en los tratamientos RA11 e IN11 del matorral desértico micrófilo, donde una de las especies dominantes es *L. tridentata* (Medina *et al.*, 2016), y se observan los mayores contenidos de MOS debido al aporte reciente de biomasa de esta especie en el suelo por la acción del rodillo. En contraste, Kabzems y Haeussler (2005) no encontraron diferencias significativas al analizar las propiedades del suelo y la respuesta de la vegetación después de remover la MOS. En nuestro estudio el

in Colombia and found out that MOS is a variable that indicates the quality and use given to the carbon that has been sequestered in the soil, since the amount of MOS tends to decrease, depending on soil use practices. The highest MOS percentage was observed in the MDRRA11 and MDRIN11 treatments, perhaps owing to the contribution of vegetable matter to the soil, as a result of the use of the roller and not from the vegetation cover and bush density. This result is similar to those of Demuner-Molina *et al.* (2014) who evaluated the effect of farming and soil enhancers in the humidity and radicular development and showed a greater crop output as a result of the enhancers that act as organic fertilizers. In contrast, Montaña-Arias *et al.* (2006) determined that low MOS contents are the result of the limited presence of bush vegetation.

*Larrea tridentata* favours fertile islands and accumulates under its canopy a greater concentration of nutrients, water holding capacity, and microbial activity (Celaya and Castellanos, 2011), which might explain the results obtained from RA11 and IN11 treatments in the mycrophyllous desert scrublands, where *L. tridentata* is one of the dominant species (Medina *et al.*, 2016), and where the highest MOS content can be found; this is the result of the recent biomass contribution of this species to the soil, after the roller was used. In contrast, Kabzems and Haeussler (2005) did not find significant differences when they analyzed soil properties and vegetation response after MOS was removed. In our study, using the aerator roller did not have a positive short-term effect, because it increased MOS, but the increase was not sustained; in contrast, an agro-forestral system increases MOS content as times goes by (Murray *et al.*, 2014). According to Martínez *et al.* (2008), MOS is responsible for soil properties, such as compaction, fertility, water retention, and structural stability. The results of our study are similar with regard to the relation between MOS and DA for all treatments; and MOS with K and IAc, in which there was a positive relationship between those variables for treatments RA04 MDM and IN11 treatments for both types of vegetation. pH showed two clearly defined groups and five subgroups: group *a* included the MDRIN11 treatment with the lowest pH, while group *d* included the MDRRA04 treatment with the highest pH.

uso de rodillo aireador funcionó bien a corto plazo porque aumentó la MOS, pero el incremento no se mantuvo; en contraste, un sistema agroforestal incrementa a través del tiempo el contenido de MOS (Murray *et al.*, 2014). Según Martínez *et al.* (2008), la MOS es responsable de la naturaleza de propiedades del suelo como la compactación, la fertilidad, la retención de agua y la estabilidad de la estructura. En nuestro estudio los resultados son similares respecto a la relación entre la MOS y la DA para todos los tratamientos y la MOS con K y la IAc, en la cual hubo una relación positiva entre dichas variables para los tratamientos RA04 del MDM y del IN11 de ambos tipos de vegetación. El pH mostró dos grupos definidos y cinco subgrupos: el grupo *a* incluyó el tratamiento MDRIN11 con el pH más bajo y el grupo *d* incluyó el tratamiento MDRRA04 con el mayor pH.

El valor K del suelo mostró tres grupos definidos: en el grupo *a*, el tratamiento MDRRA11 ( $0.298 \text{ cm s}^{-1}$ ); en el grupo *b*, los tratamientos MDMt ( $0.004 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDMRA04 ( $0.004 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDMRA11 ( $0.002 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDMIN11 ( $0.004 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDRt ( $0.005 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDRRA04 ( $0.004 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDRRA08 ( $0.003 \text{ cm s}^{-1}$ ), y MDRIN11 ( $0.004 \text{ cm s}^{-1}$ ); en el grupo *c*, el tratamiento MDMRA08 ( $0.007 \text{ cm s}^{-1}$ ).

La IAc presentó dos grupos definidos y cinco subgrupos: el tratamiento MDMRA11 ( $109.22 \text{ cm h}^{-1}$ ) presentó la menor infiltración acumulada y se ubicó en el grupo *a*; en el grupo *e* se ubicó el tratamiento MDMIN11 ( $396.44 \text{ cm h}^{-1}$ ) con la mayor IAc. El uso de rodillo aireador disminuyó la IAc en los tres tratamientos, respecto al testigo en ambos tipos de vegetación, pero el tratamiento MDMIN11 presentó la mayor IAc de todos los tratamientos. Estos resultados difieren de los obtenidos por Velásquez *et al.* (2011) con tres tratamientos (pastoreo continuo, exclusión al pastoreo y el paso de rodillo aireador), pero la infiltración no fue diferente entre sitios ni entre tratamientos.

Para la RMP se obtuvieron dos grupos y cuatro subgrupos: en el grupo *a*, el tratamiento MDRRA11 ( $2.19 \text{ kg cm}^{-2}$ ) con la menor resistencia a la penetración; en el grupo *d*, el tratamiento MDRRA04 ( $7.19 \text{ kg cm}^{-2}$ ). Los tratamientos de 2004 (MDMRA04 y MDRRA04) causaron un aumento en la RMP: en 4 % matorral micrófilo y 37 % en el del rosetófilo respecto a los testigos. En contraste, en los

The soil K value showed three clearly defined groups: group *a* included the MDRRA11 ( $0.298 \text{ cm s}^{-1}$ ) treatment; group *b* included the MDMt ( $0.004 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDMRA04 ( $0.004 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDMRA11 ( $0.002 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDMIN11 ( $0.004 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDRt ( $0.005 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDRRA04 ( $0.004 \text{ cm s}^{-1}$ ), MDRRA08 ( $0.003 \text{ cm s}^{-1}$ ), and MDRIN11 ( $0.004 \text{ cm s}^{-1}$ ) treatments; and group *c* included the MDMRA08 ( $0.007 \text{ cm s}^{-1}$ ) treatment.

IAc showed two clearly defined groups and five subgroups: the MDMRA11 ( $109.22 \text{ cm h}^{-1}$ ) treatment had the least cumulative infiltration and was included in group *a*; group *e* included the MDMIN11 ( $396.44 \text{ cm h}^{-1}$ ) treatment which had the highest IAc. In both vegetation types, using a roller diminished IAc in the three treatments, in relation to the control; however, the MDMIN11 treatment showed the highest IAc in all treatments. These results differ from the ones obtained by Velásquez *et al.* (2011) with three treatments (continuous grazing, grazing exclusions, and aerator roller), but there were no differences in infiltration across sites or treatments.

Two groups and four subgroups were obtained for RMP: MD-RRA11 ( $2.19 \text{ kg cm}^{-2}$ ) and MD-RRA04 ( $7.19 \text{ kg cm}^{-2}$ ) were the treatments that showed less resistance to penetration, for group *d* and group *a*, respectively. The 2004 treatments (MDMRA04 and MDRRA04) caused an increase in RMP: 4 % in mycophyllous scrublands, and 37 % in rosette scrublands, in relation to the controls. In contrast, in the 2008 roller treatments, both kinds of vegetation underwent a 24 % RMP reduction; the resistance was 50 % less in relation to control, when the RA11 treatment was used. In the IN11 treatment in a mycophyllous scrubland, soil was 51 % less resistant to penetration, while resistance was 18 % lower with a rosette treatment, in relation to the control. Likewise, in relation to the control, using a roller diminished RMP up to 50 % in the mycophyllous desert scrublands, and up to 59 % when the MDRRA11 treatment was used. These results match those of Ohep *et al.* (1998) who analyzed the effect of farming on the soil physical properties and found that there were significant differences with regard to DA, macroporosity, microporosity, and resistance to penetration for farming treatments. The similarity in results may be the consequence of ploughing the first soil stratum during farming and using the aerator roller.

tratamientos de rodillo del 2008 hubo una menor RMP de 24 % en ambos tipos de vegetación; en el tratamiento de RA11 de ambos tipos de vegetación la resistencia fue menor en 50 % con respecto al testigo. En el tratamiento IN11 del matorral micrófilo, el suelo tuvo menor resistencia a la penetración en 51 % y en el tratamiento del rosetófilo la resistencia fue menor en 18 % respecto al testigo. Asimismo, respecto al testigo el uso de rodillo disminuyó la RMP hasta en 50 % del matorral desértico micrófilo, y hasta en 59 % en el tratamiento de MDRRA11. Estos resultados concuerdan con los de Ohep *et al.* (1998) quienes analizaron el efecto de la labranza sobre las propiedades físicas del suelo y encontraron diferencias significativas en la DA, macroporosidad, microporosidad y resistencia a la penetración para los tratamientos de labranza. Esta similitud de resultados se puede deber a que durante la labranza y el uso de rodillo aireador se logra roturar el primer estrato del suelo.

### CONCLUSIONES

En ambos matorrales desérticos el uso de rodillo aireador es una alternativa de manejo del suelo eficiente para incrementar la materia orgánica y disminuir la compactación de suelo en los primeros tres años de establecido el tratamiento. Además, en el matorral desértico rosetófilo la infiltración de agua aumenta y la resistencia mecánica a la penetración de suelo disminuye en los primeros tres años después del uso de rodillo.

El fuego es una alternativa viable para incrementar la materia orgánica del suelo en ambos tipos de vegetación: en el matorral desértico micrófilo incrementa la infiltración acumulada, mientras que en el matorral desértico rosetófilo disminuye la compactación de suelo. Pero los beneficios proporcionados por el fuego son a corto plazo.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Universidad Autónoma de Nuevo León, CEMEX-NATURALEZA SIN FRONTERAS A.C. y al Dr. Alejandro Espinoza Treviño, M.C. Jonás A. Delgadillo y Billy Pat McKinney por el apoyo brindado para realizar la presente investigación. Asimismo, se agradece la asistencia técnica de laboratorio de la M.C. María Inés Yáñez.

### CONCLUSIONS

In both desert scrublands, using an aerator roller is an efficient alternative method to manage the soil that increases the organic matter and reduces soil compaction during the first three years of the treatment. Additionally, during the first three years after the roller is used, water infiltration increases and mechanical resistance to soil penetration diminishes in rosette scrublands.

Fire is a feasible alternative that increases organic soil matter in both types of vegetation: cumulative infiltration increases in mycrophyllous desert scrublands, while soil compaction diminishes in rosette desert scrublands. However, fire has short-term benefits.

—End of the English version—



### LITERATURA CITADA

- Anaya, N. E., y H. Barral. 1995. La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semi-árida de México. Aplicación al caso de la Hacienda Atotonilco y de la comunidad La Virgen, Durango. Manejo y uso del agua en las cuencas hidrográficas del norte de México. CENID-RASPA, ORSTOM Folleto Científico 5: 1-78.
- Anriquez, A., A. Albanesi, C. Kunst, R. Ledesma, C. López, A. Rodríguez, R. Torresi, y J. Godoy. 2005. Rolado de fachinales y calidad de suelo en el Chaco occidental, Argentina. *Cienc. Suelo* 23: 145-157.
- Ayala, F. A., B. F. G. Denogean, M. S. Moreno, A. Durán, B. Martínez, L. Barrera y E. Gerlach. 2014. Rehabilitación y Mejoramiento de Hábitat para la fauna silvestre. *INVURNUS* 9: 18-22.
- Bhattacharyya, R., S. Kundu, S. C. Pandey, K. P. Singh, and H. S. Gupta. 2008. Tillage and irrigation effects on crop yields and soil properties under the rice-wheat system in the Indian Himalayas. *Agric. Water Manage.* 95: 993-1002.
- Carrasco, S. J., N. F. Squella, S. J. Riquelme, C. J. Hirzel, y C. H. Uribe. 2012. Técnicas de conservación de suelos, agua y vegetación. Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Rayentué, Rengo, Chile. Serie Actas 48: 1-210.
- Carter, M. R. 2002. Soil quality for sustainable land management. *Agron. J.* 94: 38-47.
- Casanova, F., L. Ramírez, y F. Solorio. 2007. Interacciones radiculares en sistemas agroforestales: mecanismos y opciones de manejo. *AIA* 11: 41-52.
- Casas, N., y M. Manzan. 2009. Evaluation of the use of roller aerator for the rehabilitation of grazing lands and content of carbon in arid areas of northeastern Mexico. *In: VI Simposio*



- Internacional de Pastizales 4 al 7 de Nov. Universidad Autónoma de Nuevo León – Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, N. L. s/p.
- Celaya, M. H., y A. E. Castellanos V. 2011. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoam.* 29: 343-356.
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143: 1-10.
- Cjpek, J., V. Kuráz, and J. Fourz. 2012. Hydrological properties of soils in reclaimed and unreclaimed sites after Brown-Coal mining. *Polish J. Environ. Studies* 22: 645-652.
- Cyzdik, K., and T. S. Hougue. 2009. Modeling postfire response and recovery using the hydrologic engineering center hydrologic modeling system (HEC-HMS). *J. Am. Water Resour. Assoc.* 45: 702-714.
- Darwish O. H., N. Persaud, and D. C. Martens. 1995. Effect of long-term application of animal manure on physical properties of three soil. *Plant Soil* 176: 289-295.
- Das, B. M. 1997. *Soil Mechanics Laboratory Manual, Fifth Edition.* Engineering Press, Austin, Texas. 78720-0129. pp: 5-23.
- Demuner-Molina, G., M. Cadena-Zapata, S. G. Campos-Magaña, A. Zermeño-González, y F. J. Sánchez-Pérez. 2014. Efecto de labranza y mejoradores de suelo en humedad y desarrollo radicular. *Tecnología y Ciencias del Agua.* V: 123-130.
- DOF, 2002. *Diario Oficial de la Federación.* Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Martes 31 de Diciembre. 85 p.
- Eilers, K. G., S. Debenport, S. Anderson, and N. Fierer. 2012. Digging deeper to find unique microbial communities: The strong effect of depth on the structure of bacterial and archaeal communities in soil. *Soil Biol. Biochem.* 50: 58-65.
- Estrada-Castillón, E., J. R. Arévalo, J. A. Villarreal-Quintanilla, M. M. Salinas-Rodríguez, J. A. Encina-Domínguez, H. González-Rodríguez, and C. M. Cantú-Ayala. 2014. Classification and ordination of main plant communities along an altitudinal gradient in the arid and temperate climates of northeastern Mexico. *Sci. Nature* 102: 58-68
- Gómez, G. M., C. Danglot B., y L. Vega F. 2003. Sinopsis de pruebas estadísticas no paramétricas. Cuándo usarlas. *Rev. Mex. Pediatr.* 70: 91-99.
- Hillel, D. 2004. *Encyclopedia of Soils in the Environment.* London, Elsevier. pp: 295-303.
- Huang, Z. L., L. D. Chen, B. J. Fu, Y. H. Lu, Y. L. Huang, and J. Gong. 2006. The relative efficiency of four representative cropland conversions in reducing water erosion: evidence from long-term plots in the loess Hilly Area, China. *Land Degrad. Dev.* 17: 615-627.
- INE-SEMARNAT, 1997. Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna “Maderas del Carmen”, México. 1ª. Ed. 127 p.
- Jia, X. X., M. A. Shao, X. R. Wei, R. Horton, and X. Z. Li. 2011. Estimating total net primary productivity of managed grasslands by a state-space approach in a small catchment on the Loess Plateau, China. *Geoderma* 160: 281-291.
- Kabzems, R., and S. Haeussler. 2005. Soil properties, aspen, and white spruce responses 5 years after organic matter removal and compaction treatments *Can. J. Forest Res.* 35: 2045-2055.
- Lahura, E. 2003. El coeficiente de correlación y correlaciones espúreas. Documento de trabajo 218. <http://www.pucp.edu.pe/economia/pdf/DDD218.pdf> (Consulta: enero 2014).
- Lauber, C. L., M. S. Strickland, M. A. Bradford, and N. Fierer. 2008. The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types. *Soil Biol. Biochem.* 40: 2407-2415.
- Li, X., F. Li, R. Zed, Z. Zhan, and B. Singh. 2007. Soil physical properties and their relations to organic carbon pools as affected by land use in an alpine pastureland. *Renew. Agr. Food Syst.* 21: 26-35.
- López-Ritas, J. 1967. *El Diagnóstico de Suelos y Plantas: Métodos de Campo y Laboratorio.* Madrid. Mundi – Prensa. 333 p.
- Lozano, Z., H. Romero, y C. Bravo. 2010. Influencia de los cultivos de cobertura y el pastoreo sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana. *Agrociencia* 44: 135-146.
- Maass, J. M. 1998. La erosión de suelos en México: una consecuencia de la transformación del hábitat y uno de los problemas más serios de la degradación ambiental. *In: Toledo, G., y M. Leal (eds). Destrucción del Hábitat.* PUMA, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. pp: 271-285.
- Martínez, E. H., J. P. Fuentes E., y E. Acevedo H. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8: 68-96.
- McCune, B., and J. A. B. Grace. 2002. *Analysis of Ecological Communities.* 2ª. Ed. MjM Software Design, Oregon, USA. 304 p.
- McKinney, B. R., P. Robles Gil, R. Skiles, V. J. Delgadillo, y J. Rojo. 2006. El Carmen-Big Bend: Un innovador modelo de alianzas públicas y privadas para la conservación transfronteriza. *In: Mittermeier, R., C. F. Kormos, C. G. Mittermeier, P. Robles Gil, T. Sandwith, y C. Besaçon (eds). Conservación Transfronteriza: Una Nueva Visión para Áreas Protegidas.* CEMEX, Monterrey, México. pp: 101-112.
- Medina, G. R., I. Cantú S., E. Estrada C., H. González R., y J. A. Delgadillo V. 2016. Cambios en la vegetación del matorral desértico micrófilo en un área bajo manejo. *Rev. Mex. Cien. For.* 6: 37-48.
- Molinar-Holguín, F., H. Souza-Gomes, J. Holechek L., y R. Valdez. 1998. México, Macro-economía y manejo de pastizales. *Rangelands* 20: 16-24.
- Montaño-Arias, N. M., R. García S., G. Ochoa R., y A. Monroy A. 2006. Relación de la vegetación arbustiva, el mezquite y el suelo de un ecosistema semiárido en México. *Terra Latinoam.* 24: 193-205.
- Murray, R. M., M. G. Orozco, A. Hernández, C. Lemus, y O. Nájera. 2014. El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Avances Inv. Agropec.* 18: 23-31.
- Nandapure, S. P., B. A. Sonune, V. V. Gabhane, R. N. Katkar, and R. T. Patil. 2011. Long term effects of integrated nutrient management on soil physical properties and crop productivity in sorghum-wheat cropping sequence in a vertisol. *Indian J. Agric. Res.* 45: 336-340.
- Ohep, C., F. Marcano, y O. Sivira. 1998. Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas del suelo y el rendimiento del frijol (*Vigna unguiculata* L. Walp) en el Yaracuy medio. *Bioagro* 10: 68-75.
- Ott, R. L. 2001. *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis.* 5a Ed. Duxbury Thomson Learning. Michael Longnecker. Texas A & M University. U.S.A. 1152 p.

- Pei, S., H. Fu, and C. Wan. 2008. Changes in soil properties and vegetation following enclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia, China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 124: 33-39.
- Pennock, D., T. Yates, and J. Braidek. 2008. Soil sampling designs. *In: Carter, M. R., and E. G. Gregorich (eds). Soil Sampling and Methods of Analysis.* 2nd. Ed. Taylor & Francis Group. LLC. 25-39 p.
- Rasoulzadeh, A., and A. Yaghoubi. 2014. Inverse modeling approach for determining soil hydraulic properties as affected by application of cattle manure. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 7: 27-35.
- Rumpel, C., and I. Kögel-Knabner. 2011. Deep soil organic matter a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant Soil* 338: 143-158.
- Rusan, M. J. M., S. Hinnawi, and L. Rousan. 2007. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination* 215: 143-152.
- Silva-Arredondo, F., M. Pando-Moreno, H. Gonzalez-Rodriguez, and L. Scott-Morales. 2013. Changes in the chemical properties of a soil impacted by intensive agriculture, North-eastern Mexico. *Int. J. Bio-resource Stress Manage.* 4: 126-131.
- Six, J., H. Bossuyt, S. D. Degryze, and K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79: 7-31.
- Spedding, T. A., C. Hamel, G. R. Mehuys, and C. A. Madramootoo. 2004. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biol. Biochem.* 36: 499-512.
- SPP. 1982a. Secretaría de Programación y Presupuesto. 1982. Carta Estatal de Edafología. Dirección General de Geografía del Territorio Nacional. Cartas H 13-9 y H13-12. Esc: 1: 250,000.
- SPP. 1982b. Secretaría de Programación y Presupuesto. Carta Estatal de Geología. 1982. Dirección general de Geografía del Territorio Nacional. Cartas H 13-9 y 13-12. Esc: 1: 250,000.
- SPP. 1983. Secretaría de Programación y Presupuesto. Síntesis Geográfica de Coahuila y anexo cartográfico. s/p.
- Swędryńska, D., I. Malecka, A. Blecharezyk, A. Swędryński, and J. Starzyk. 2013. Effects of various long-term tillage systems on some chemical and biological properties of soil. *Polish J. Environ. Studies* 22: 1835-1844.
- Velasquez E., P. Lavelle, and M. Andrade. 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biol. Biochem.* 39: 3066-3080.
- Velasquez, V. M. A., R. Gutiérrez L., and A. Muñoz. 2011. Vegetation management and their impact on the soil hydrological response in a semiarid rangeland. *Ing. Agríc. Biosist.* 3: 17-23.
- Walpole, R. E., H. R. Myers, y L. S. Myers. 1999. Probabilidad y Estadística para Ingenieros. 6ª Ed. Prentice Hall Hispanoamericana. México. 752 p.
- Wang, L., Y. Mu, Q. Zhang, and Z. I. Jia. 2012. Effects of vegetation restoration on soil physical properties in the wind-water erosion region of the Northern Loess Plateau of China. *Clean-Soil Air Water* 40: 7-15.
- Zhang, Z. H., X. Y. Li, Z. Y. Jiang, H. Y. Peng, L. Li, and G. Q. Zhao. 2013. Changes in some soil properties induced by re-conversion of cropland into grassland in the semiarid steppe zone of Inner Mongolia, China. *Plant Soil* 373: 89-106.
- Zhang, P., T. Wei, Z. Jia, Q. Han, X. Ren, and Y. Li. 2014. Effects of Straw incorporation on soil organic matter and soil water-stable aggregates content in semiarid regions of northwest China. *PLoS ONE* 9: 1-11.