



DOI: [10.29298/rmcf.v14i78.1385](https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i78.1385)

Artículo de Investigación

## Evaluación del efecto de obras de conservación en suelos forestales de Tlaxcala, México

### Assessment of the effects of conservation works in forest soils of Tlaxcala, México

Elizabeth García Gallegos<sup>1</sup>, Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha<sup>1\*</sup>, Vidal Guerra-De la Cruz<sup>2</sup>, Francisco Javier Cocoltzi Pérez<sup>1</sup>

Fecha de recepción/Reception date: 4 de abril de 2023

Fecha de aceptación/Acceptance date: 20 de junio de 2023.

<sup>1</sup>Maestría en Ciencias en Sistemas del Ambiente, Centro de Investigación en Genética y Ambiente. Universidad Autónoma de Tlaxcala. México.

<sup>2</sup>Sitio Experimental Tlaxcala. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.

\*Autor para correspondencia; correo-e: [oscar.vazquez@docente.uatx.mx](mailto:oscar.vazquez@docente.uatx.mx)

\*Corresponding author; e-mail: [oscar.vazquez@docente.uatx.mx](mailto:oscar.vazquez@docente.uatx.mx)

#### Resumen

Las obras de conservación de suelos son muy utilizadas en México para disminuir la erosión y propiciar la recuperación de suelos erosionados. Estas obras son particularmente notables en Tlaxcala, estado que presenta grandes superficies con diferentes niveles de erosión edáfica. El estudio se llevó a cabo en 2020 en las localidades Gustavo Díaz Ordaz, Zacapexco y San Bartolomé Matlahocan, Tlaxcala; sitios con obras de conservación de suelo (zanja bordo y zanja trinchera). El objetivo fue evaluar el impacto del establecimiento de las obras de conservación a través de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En el sitio Gustavo Díaz Ordaz, los valores de las propiedades del suelo no fueron significativamente diferentes respecto al testigo a ocho años de su implementación. En Zacapexco, a cinco años de la construcción de las zanjas bordo, se verificó un impacto positivo en varias propiedades químicas y biológicas del suelo. En San Bartolomé Matlahocan, después de más de 40 años de la realización de las zanjas bordo, no se observaron cambios significativos en las propiedades biológicas del suelo. El análisis de componentes principales permitió identificar que la materia orgánica (*MO*), la capacidad de intercambio catiónico (*CIC*), calcio, pH, N total y la proporción de arcilla y arena son propiedades que influyen de manera importante en la calidad del suelo en los sitios de estudio, por lo que el monitoreo de estas variables es de gran utilidad en la evaluación del impacto de obras de conservación.

**Palabras clave:** Calidad del suelo, degradación del suelo, prácticas de conservación, propiedades edáficas, zanja bordo, zanja trinchera.

#### Abstract

Soil conservation practices are widely used in Mexico to reduce soil erosion and to promote recovering of eroded soils. These practices are particularly important in the state of *Tlaxcala*, which has extensive areas with different levels of soil erosion. The study was carried out in 2020 in *Gustavo Díaz Ordaz*, *Zacapexco* and *San Bartolomé Matlahocan*, sites with soil conservation practices (board-ditches and trench-ditches). The objective was to assess the effects of soil conservation practices through physical, chemical and biological soil properties at each location site. At the *Gustavo Díaz Ordaz* site, the values of soil properties did not significantly differ from the control with the conservation practices after eight years of its establishment. At *Zacapexco*, after five years of the establishment of board-ditches, there is a positive impact on several chemical and biological soil properties, whereas, at *San Bartolomé Matlahocan*, after more than 40 years of establishment of board-ditches, there were

no significant effects on biological properties of the soil. A principal components analysis allowed us to identify that organic matter content (*OM*), cation exchange capacity (*CEC*), calcium, pH, total N and the proportion of clay and sand, are properties that significantly influence soil quality in the study sites, therefore, monitoring these variables is greatly useful in assessing the impact of conservation practices.

**Key words:** Soil quality, soil degradation, conservation practices, edaphic properties, board-ditch, trench-ditch.

## Introducción

En México, factores socioeconómicos y las actividades humanas (agricultura, ganadería y deforestación) influyen en la degradación de los suelos al propiciar la erosión eólica e hídrica (Cotler *et al.*, 2022); en particular, en zonas rurales (Espinosa *et al.*, 2011; Li y Fang, 2016) del estado de Tlaxcala se presenta este problema en 76.8 % de su superficie (Semarnat y Colpos, 2002).

Debido a esa problemática situación, la construcción de obras de conservación de suelo ha sido muy recomendada para acelerar el proceso de su rehabilitación, ya que buscan mejorar y recuperar la calidad y minimizar el proceso de erosión de los suelos. Dentro de las obras de conservación de suelo, en México destaca la zanja trinchera, la cual se implementa indistintamente en diversas condiciones geográficas y ecológicas (Cotler *et al.*, 2015); sin embargo, se argumenta que su construcción puede afectar las condiciones de infiltración del agua, incrementar el proceso de erosión y disminuir el contenido de carbono orgánico (*CO*) en el suelo, lo que afecta la actividad biológica (Cotler *et al.*, 2022).

En contraste, hay estudios en los que se consignan resultados positivos con algunas obras de conservación. Por ejemplo, González-Romero *et al.* (2018) analizaron, a lo largo del tiempo, la funcionalidad y el efecto en el suelo del establecimiento de presas de control de azolves a través de las propiedades físicas, químicas y

biológicas. Los mismos autores indicaron que las obras influyeron de manera positiva en la disminución de la densidad aparente (*DA*) y el pH, además de registrar incrementos en la concentración de *MO* y de la actividad de la enzima deshidrogenasa (*DHS*).

Por otro lado, en terrazas a base de piedra como obra de conservación se mejoraron las condiciones del suelo, con respecto a sitios sin ellas, los efectos positivos se evidenciaron en la fertilidad del suelo y producción vegetal (Welemariam *et al.*, 2018). Reyes *et al.* (2019) registran que las zanjas bordo favorecen la captación de agua, y con ello el establecimiento de especies vegetales. Los pastos y otras herbáceas se establecen con mayor rapidez en áreas con obras de conservación debido al incremento de la humedad en el suelo (Doria *et al.*, 2022). Muscolo *et al.* (2014) señalan que las propiedades del suelo son sensibles a las variaciones del clima y manejo, por lo que evaluarlas permitirá identificar los impactos de la degradación.

Por lo anterior, bajo las diferentes condiciones edáficas de los sitios y la intervención por medio de las obras de conservación y el establecimiento de la vegetación es posible un cambio positivo en las variables edáficas. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con y sin presencia de obras de conservación y determinar posibles efectos y relaciones entre dichas propiedades en cada área de estudio.

## **Materiales y Métodos**

### **Sitios de estudio**

**Sitio 1. Ejido Gustavo Díaz Ordaz (GDO).** Se localiza en el municipio Emiliano Zapata (19°32'31.6" N y 98°08'58.0" O) a 2 415 msnm, con una superficie total de 470 ha. Clima templado subhúmedo, temperaturas entre 6.5 y 22.1 °C, precipitación de 6.8 a 140.8 mm, y orden de suelo predominante Leptosol (30.11 %) (INEGI, 2010a). La vegetación dominante es bosque de pino-encino (*Pinus pseudostrobus* Lindl., *P. greggii* Engelm. ex Parl., *Quercus laurina* Bonpl. y *Q. rugosa* Née) (Conafor, 2012), y entre las obras de conservación hay una notable presencia de pastos.

En 2012, se establecieron diferentes obras de conservación en el paraje Peña del Chivo, cuyos suelos muestran degradación moderada debido a la deforestación y erosión hídrica; en 30 ha se construyeron zanjas trinchera y zanjas bordo de manera alternada, con una pendiente de 40° (Conafor, 2012). El área específica de estudio fue de 2.5 ha, incluidas las obras de conservación y el testigo (sin obras de conservación).

**Sitio 2. Zacapexco (ZAC).** Predio de propiedad privada dentro de la comunidad San Pedro Ecatepec, municipio Atlangatepec (19°32'31.6" N y 98°08'58.0" O) con un intervalo altitudinal entre 2 480 y 2 600 m; clima templado subhúmedo con lluvias en verano, temperatura entre 12 y 14 °C, precipitación de 600 a 700 mm, y orden de suelo Phaeozem (54 %) (INEGI, 2010b).

En 2015, se construyeron 40 ha de zanja bordo y 50 ha de terrazas individuales. En el lugar hay pendientes de 15 a 20 % y la degradación del suelo fue causada, principalmente, por sobrepastoreo y erosión hídrica de tipo laminar (Conafor, 2015). La vegetación predominante corresponde a bosques de *Juniperus deppeana* Steud., donde se establecieron las obras de conservación se plantó *Pinus pseudostrobus*.

**Sitio 3. San Bartolomé Matlalohcan (SBM).** Comunidad que se localiza en el municipio Tetla de La Solidaridad (19°28'11.68" N y 98°07'16.65" O) a una altitud promedio de 2 516 m; clima templado subhúmedo con lluvias en verano, temperatura de 12 a 14 °C, precipitación entre 600 y 900 mm, y orden de suelo Phaeozem (61.8 %), con una pendiente de 15 a 20 % (INEGI, 2010c). Entre los años 1976 y 1978 se construyeron zanjas bordo y terrazas en 7 ha, como parcelas experimentales del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), para la rehabilitación del tepetate. Durante el muestreo se observó la presencia de especies introducidas como el eucalipto (*Eucalyptus* L'Hér. spp.) y la casuarina (*Casuarina equisetifolia* L.).

### **Muestreo de suelo y preparación de las muestras**

En el sitio GDO se trazó una cuadrícula con cuadrantes de 158 m×158 m en 2.5 ha de terreno, mediante el método sistemático de muestreo de suelo de Schweizer (2011). Se seleccionaron dos cuadrantes con zanja trinchera (18 muestras) y dos con zanja bordo (18 muestras), además de seis muestras en un cuadrante como testigo (sin obra de conservación). Dentro de cada cuadrante, las muestras de suelo se recolectaron entre zanjas a una profundidad de 0-30 cm. En ZAC se muestrearon 3 ha con zanja bordo (nueve muestras) y como testigo, 1 ha (sin obra de conservación, cinco muestras). Para SBM, el muestreo fue en 1.5 ha con zanja bordo (nueve muestras) y en 0.5 ha sin obra de conservación considerada testigo (nueve muestras).

Para el análisis microbiológico se tomaron 100 g de cada una de las muestras de suelo y se trasladaron al Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigación en Genética y Ambiente-UATx, dentro de una hielera *Coleman*<sup>®</sup> con bolsas de gel refrigerante de 250 g *POWERICE*<sup>®</sup>. Por cada sitio, se consideraron muestras compuestas por el método del cuarteo con base en la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002). Para GDO se obtuvieron 14 muestras compuestas, en ZAC siete y SBM seis; posteriormente, se almacenaron a 4 °C en un refrigerador *Imbera*<sup>®</sup> para inhibir la actividad microbiana. El resto del suelo de cada muestra se colocó en papel *Kraft* para secarse a temperatura ambiente y a la sombra; se tamizó en una malla de 2 mm, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002).

## **Análisis de suelo**

A cada muestra de suelo se le determinó textura, *Da* (Densidad aparente), *CE* (Conductividad eléctrica), *MO* (Materia orgánica), *CO* (Carbono orgánico), *CIC* (Capacidad de intercambio catiónico), pH, N total, fósforo, potasio, calcio y magnesio por los métodos establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002); la respiración microbiana se determinó a través de la cuantificación de CO<sub>2</sub>, la actividad de la enzima deshidrogenasa; y la biomasa bacteriana por los métodos de García *et al.* (2003).

## **Análisis de los datos**

Los datos se analizaron por sitio mediante análisis de varianza unifactorial y una prueba de comparación de medias *Tukey* ( $p=0.05$ ). Previamente, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad (*Kolmogorov*) y homogeneidad de varianza (*Levene*). El modelo empleado para el análisis fue el descrito en la Ecuación 1 (InfoStat, 2008).

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Donde:

$\mu$  = Promedio general

$\tau_i$  = Efecto del *i-ésimo* tratamiento

$\varepsilon_{ij}$  = Error experimental

A partir de las propiedades del suelo de los tres sitios con y sin obras de conservación, se realizó un análisis de correlación de *Pearson* ( $p=0.05$ ) y un análisis de componentes principales (*ACP*) para conocer su contribución a la variación total de los datos. Todo lo anterior se hizo con el *software* estadístico *InfoStat* versión libre 2020 (InfoStat, 2008).

## Resultados y Discusión

## Gustavo Díaz Ordaz

Los suelos entre los tratamientos zanjas bordo y trinchera presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en biomasa bacteriana y N total, con respecto al testigo. Con base en los valores observados en estas dos variables, es claro que las obras de conservación de suelo y la vegetación presente no aumentaron los valores, ya que resultaron menores al testigo (Cuadro 1). Lo anterior coincide con Cotler *et al.* (2013), quienes refieren que la construcción de zanjas trinchera no permite un incremento en el contenido de N total, aún con la presencia de vegetación; señalan que la mineralización de la hojarasca a formas inorgánicas (amonio y nitratos) depende de la cantidad que pueda convertirse por la biomasa microbiana, que en este caso también resultó menor con las obras de conservación, lo que sugiere baja efectividad de la zanja trinchera. Beltrán *et al.* (2018) señalan que el establecimiento de especies vegetales favorece una mayor diversidad de microorganismos y actividad microbiana; de tal forma que se establecen relaciones tróficas que contribuyen a la mejora de la calidad del suelo.

**Cuadro 1.** Análisis de varianza de parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo con y sin obra de conservación en GDO.

Parámetro	valor de $p$	Zanja bordo	Zanja trinchera	Testigo	Referencia <sup>†</sup>
Arena (%)	0.1955	71.9±1.0 a	73.1±1.07 a	75.76±1.8 a	Franco arenoso
Arcilla (%)	0.1846	5.94±0.62 a	6.61±0.64 a	4.28±1.07 a	
Limo (%)	0.3362	22.1±0.96 a	20.28±0.9 a	19.96±1.6 a	
$Da$ (g cm <sup>-3</sup> )	0.4839	0.94±0.02 a	0.92±0.02 a	0.91±0.02 a	<1
pH	0.4926	6.27±0.11 a	6.09±0.12 a	6.06±0.20 a	5.1–6.5



CE (dS m <sup>-1</sup> )	0.8187	0.06±0.0024 a	0.06±0.0042 a	0.06±0.002 a	<1
MO (%)	0.6423	5.10±0.42 a	4.53±0.44 a	4.87±0.80 a	4.1-6.0
CO (%)	0.6423	2.96±0.25 a	2.62±0.25 a	2.82±0.47 a	1.2-2.9
CIC [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.5700	45±4.01 a	38.9±4.12 a	43.2±6.94 a	2.9-4.6 >40 25-40
N total (%)	≤0.0001	0.16±0.01 b	0.12±0.01 c	0.39±0.01 a	<0.30
P (mg kg <sup>-1</sup> )	0.8333	8.37±1.15 a	9.15±1.15 a	10.69±1.63 a	<15
Ca [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.0526	7.55±0.04 a	5.6±0.04 a	6±0.05 a	5-10
Mg [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.1250	2.4±0.14 a	1.8±0.14 a	2±0.2 a	1.3-3.0
K [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.6250	0.40±0.04 a	0.45±0.04 a	0.4±0.05 a	0.3-0.6
Respiración microbiana (mg C- CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> suelo)	0.3725	23.35±1.34 a	21.39±1.38 a	23.93±2.33 a	-----
Enzima deshidrogenasa (μg TTC g <sup>-1</sup> suelo)	0.7954	0.51±0.09 a	0.47±0.09 a	0.42±0.11 a	-----
Biomasa bacteriana (UFC×10 <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> suelo)	0.0021	1 142±108.28 b	845±98.85 b	1 820±171.21 a	-----

\*Letras iguales por fila indican que no hay diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ); Media de *Tukey*±*E.E.*; †NOM-021-RECNAT-2000; *Da* = Densidad aparente; *CE* = Conductividad eléctrica; *MO* = Materia orgánica; *CO* = Carbono orgánico; *CIC* = Capacidad de intercambio catiónico.

El establecimiento de zanjas aunado a la vegetación después de ocho años, no modificó las propiedades físicas del suelo; la fracción arena predomina en 73 % en promedio y la densidad aparente sin variación. En cambio, aún sin diferencias significativas, las propiedades químicas mostraron que la presencia del arbolado tiende a incrementar la acidez del suelo (Khalaji *et al.*, 2021). Con las zanjas bordo se observó un aumento en el contenido de *MO*, *CO*, Ca, Mg y *CIC*, el cual es alto [ $>40$  Cmol (+) kg<sup>-1</sup>] con base en la NOM-021-RECNAT-2000 (Cuadro 1). Vázquez-Alvarado *et al.* (2011) refieren que las obras de conservación de suelos y una adecuada selección de especies vegetales son importantes para obtener resultados

positivos, debido a que existe un aumento en el contenido de *MO*; por lo tanto, más retención de humedad y partículas de suelo, así como un mayor número de microorganismos (Doria *et al.*, 2022). Sin embargo, no se observó para la biomasa bacteriana, que fue significativamente mayor en el suelo testigo.

## Zacapexco

En el suelo, entre las zanjas bordo, la fracción arena y arcilla, el pH, la *MO*, el *CO*, la respiración microbiana y la enzima deshidrogenasa presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), con respecto al suelo testigo (Cuadro 2). En este sitio, la construcción de las zanjas bordo, probablemente permitió un incremento en la humedad del suelo, que favorece la presencia de herbáceas y pastos asociados con *J. deppeana* y *P. pseudostrobis*, lo cual mejora las propiedades químicas y biológicas del suelo.

**Cuadro 2.** Análisis de varianza de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con y sin obra de conservación en ZAC.

Propiedad	Valor de <i>p</i>	Zanja bordo	Testigo	Referencia <sup>†</sup>
Arena (%)	0.0118	78.86±2.07 a	68.58±2.78 b	Franco arenoso
Arcilla (%)	0.0205	7.67±2.44 a	15.77±1.82 b	
Limo (%)	0.2185	13.47±1 a	15.65±1.35 a	
<i>Da</i> (g cm <sup>-3</sup> )	0.0907	0.96±0.02 a	1.03±0.03 a	<1
pH	0.0319	7.55±0.16 b	8.24±0.12 a	7.4-8.5
<i>CE</i> (dS m <sup>-1</sup> )	0.6218	0.04±0.01 a	0.04±0.01 a	<1
<i>MO</i> (%)	0.0031	3.94±0.38 a	1.61±0.5 b	<4.0

CO (%)	0.0031	2.28±0.22 a	0.9±0.29 b	<1.2 1.2-2.9
CIC [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.1566	30.58±1.24 a	27.45±1.66 a	25-40
N total (%)	0.1613	0.23±0.04 a	0.27±0.05 a	<0.30
P (mg kg <sup>-1</sup> )	0.1000	0.3±0 a	0.4±0 a	0.3-0.6
Ca [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.3815	8.8±1.98 a	5.6±2.42 a	5-10
Mg [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.4086	2.8±0.66 a	1.8±0.81 a	1.3-3
K [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.1000	0.3±0 a	0.4±0 a	0.3-0.6
Respiración microbiana (mg C- CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> suelo)	0.0045	23.77±1.46 a	15.29±1.95 b	-----
Enzima deshidrogenasa (μg TTC g <sup>-1</sup> suelo)	0.0025	2.41±0.11 a	0.05±0.12 b	-----
Biomasa bacteriana (UFC×10 <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> suelo)	0.7245	1 047.78±133.65 a	971.67±163.69 a	-----

\*Letras iguales por fila indican que no hay diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ); Media de *Tukey*±*E.E.*; †NOM-021-RECNAT-2000; *Da* = Densidad aparente; *CE* = Conductividad eléctrica; *MO* = Materia orgánica; *CO* = Carbono orgánico; *CIC* = Capacidad de intercambio catiónico.

A cinco años del establecimiento de las obras de conservación se registra una disminución en el pH, un incremento en la *MO* y *CO*, en la *CIC*, fósforo, calcio y magnesio, así como una notable mejoría en la actividad biológica. Esto destaca la importancia de mantener e incorporar coberturas vegetales con las especies correctas junto a las obras de conservación, debido a que las plantas suministran *CO* como fuente de energía para que los organismos del suelo lleven a cabo su actividad metabólica; lo cual dependerá del tipo de suelo, época del año, clima, nutrimentos, condiciones topográficas del sitio y el tipo de vegetación (Yáñez *et al.*, 2017; Khalaji *et al.*, 2021; Doria *et al.*, 2022).

## San Bartolomé Matlalohcan

Los valores promedio de la  $D_a$ , la  $CE$ ,  $CIC$ , el contenido de Ca, Mg y K fueron significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) entre los tratamientos (Cuadro 3). Los valores del contenido de  $MO$ ,  $CO$  y de las propiedades biológicas, aunque sin diferencias significativas, presentaron un ligero incremento.

En este sitio, las obras de conservación se complementaron mediante la reforestación con árboles de eucalipto. Se ha indicado que si bien, los eucaliptos son de rápido crecimiento, tienen un efecto alelopático que impacta negativamente el suelo (Murillo *et al.*, 2005) debido a que modifican sus características y disminuyen la biodiversidad de hongos, líquenes y herbáceas. Asimismo, se altera el funcionamiento del ecosistema en procesos como la descomposición de la hojarasca por la disminución de los microorganismos del suelo (Munguía *et al.*, 2004; García-Osorio *et al.*, 2020; Solís-Vargas *et al.*, 2021), lo que se observa, de manera particular en San Bartolomé Matlalohcan.

**Cuadro 3.** Análisis de varianza de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con y sin obra de conservación en SBM.

Propiedad	Valor de $p$	Zanja bordo	Testigo	Referencia <sup>†</sup>
Arena (%)	0.1886	77.71±1.87 a	81.62±2.12 a	Franco arenoso
Arcilla (%)	0.0559	8.38±1.18 a	4.66±1.34 a	
Limo (%)	0.9417	13.91±1.66 a	13.72±1.88 a	
$D_a$ (g cm <sup>-3</sup> )	0.0004	0.91±0.02 b	1.03±0.02 a	<1
pH	0.6790	5.68±0.18 a	5.79±0.18 a	5.1-6.5
$CE$ (dS m <sup>-1</sup> )	0.0051	0.03±0.0028 a	0.01±0.0028 b	<1

MO (%)	0.4433	1.62±0.24 a	1.14±0.24 a	<4.0
CO (%)	0.4433	0.94±0.14 a	0.66±0.14 a	<1.2
CIC [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.0086	26.00±1.51 a	11.25±1.85 b	5-15 25-40
N total (%)	0.2629	0.1±0.3 a	0.15±0.3 a	<0.30
P (mg kg <sup>-1</sup> )	0.8580	7.41±0.3 a	7.33±0.3 a	<15
Ca [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.0032	8.93±0.6 a	3.6±0.6 b	2-5 5-10
Mg [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.0008	3.07±0.13 a	1.33±0.13 b	1.3-3.0 >3
K [Cmol(+) kg <sup>-1</sup> ]	0.0003	0.67±0.03 a	0.13±0.03 b	<0.2 >0.6
Respiración microbiana (mg C- CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> suelo)	0.3459	17.66±1.51 a	15.18±1.51 a	-----
Enzima deshidrogenasa (μg TTC g <sup>-1</sup> suelo)	0.6704	0.09±0.05 a	0.03±0.07 a	-----
Biomasa bacteriana (UFC×10 <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> suelo)	0.5776	350±26.26 a	328.89±26.26 a	-----

\*Letras iguales por fila indican que no hay diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ); Media de *Tukey*±*E.E.*; †NOM-021-RECNAT-2000; *Da* = Densidad aparente; *CE* = Conductividad eléctrica; *MO* = Materia orgánica; *CO* = Carbono orgánico; *CIC* = Capacidad de intercambio catiónico.

La hojarasca constituye la fuente más importante de nutrientes. Particularmente, la descomposición de las hojas de eucalipto libera mayor cantidad K (0.96 %) que de P (0.06 %) y N (0.89 %), lo cual depende de las condiciones del suelo (Munguía *et al.*, 2004). La capacidad de intercambio catiónico se verificó por el contenido de arcilla, la cual fue mayor con la presencia de la zanja bordo, ya que la materia orgánica fue baja, a partir de la lenta descomposición de la hojarasca (Welemariam *et al.*, 2018; García-Osorio *et al.*, 2020).

## Relación entre propiedades del suelo

La *Da* se correlacionó negativamente con la *MO*, potasio, calcio y respiración microbiana; ello significa que, si disminuye la *Da* se tendrá una menor compactación, esto aumentará el espacio poroso, y consecuentemente, habrá un incremento en la capacidad de almacenamiento de agua, que a su vez impactará en las funciones de los microorganismos del suelo (Notaro *et al.*, 2018; Rosero *et al.*, 2019; Barajas *et al.*, 2020). Cotler (2015) evaluó la construcción de zanjas trinchera y refirió que la *Da* se incrementó; el autor explicó que el material depositado sufre una alteración que se refleja en la *MO* y la actividad microbiana, como se observó en el sitio GDO.

El contenido de *MO* es una medida de la calidad del suelo, ya que se considera una fuente de energía y reserva de nutrientes, contribuye a la resiliencia del sistema suelo-planta, favorece a la *CIC*, mejora la disponibilidad de fósforo, influye en el incremento de la capacidad de retención hídrica y atenúa las variaciones térmicas del suelo, además de la diversidad y actividad microbiana (Fischer y Dubis, 2019; Frugoni *et al.*, 2020). Esta situación se observó en GDO y ZAC con el establecimiento de la zanja bordo y la vegetación, con una mejoría en las propiedades químicas y biológicas del suelo. Por otra parte, la *MO* también influyó positivamente sobre la *CE*, P, K y Ca. El N total con la biomasa bacteriana y la *CIC*, que fue mayor en los tres sitios, se asocia positivamente con el Mg, pero negativamente con K y Ca (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Correlación *Pearson* de propiedades del suelo con y sin obra de conservación en tres sitios de Tlaxcala.

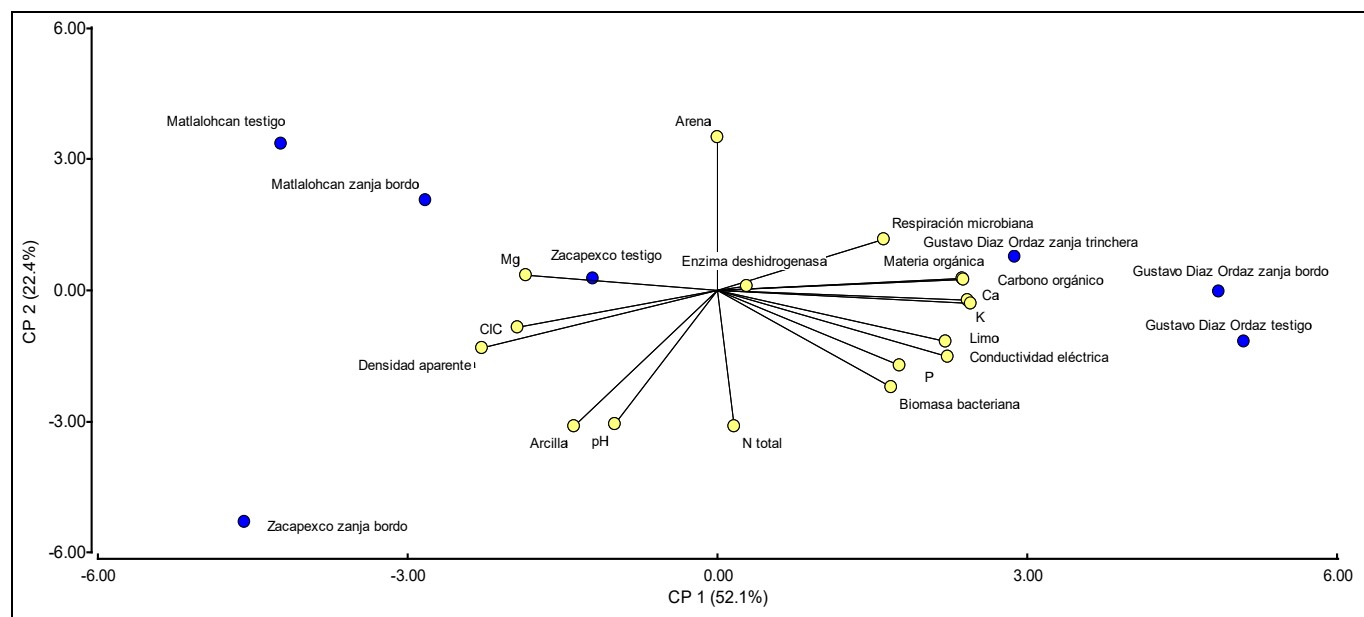
Arena	Arcilla	Limo	<i>Da</i>	pH	<i>CE</i>	<i>MO</i>	<i>CO</i>	N	P	<i>CIC</i>	Mg	K	Ca	<i>RM</i>	<i>BB</i>	<i>DHS</i>
-------	---------	------	-----------	----	-----------	-----------	-----------	---	---	------------	----	---	----	-----------	-----------	------------

Arena	1																	
Arcilla	-0.80*	1																
Limo	-0.4	-0.21	1															
Da	-0.35	0.75	-0.63	1														
pH	-0.64	0.85*	-0.24	0.63	1													
CE	-0.42	-0.11	0.89*	-0.66	0.01	1												
MO	0.13	-0.57	0.68	-0.89*	-0.27	0.83*	1											
CO	0.12	-0.57	0.69	-0.89*	-0.27	0.83*	1.00*	1										
N	-0.51	0.49	0.21	0.18	0.62	0.23	0.01	0.03	1									
P	-0.4	0.04	0.69	-0.62	0.05	0.82*	0.65	0.65	0.37	1								
CIC	-0.1	0.61	-0.76*	0.63	0.64	-0.55	-0.56	-0.56	0.17	-0.2	1							
Mg	0.09	0.38	-0.7	0.47	0.2	-0.65	-0.61	-0.62	-0.13	-0.21	0.86*	1						
K	-0.16	-0.45	0.95*	-0.78*	-0.4	0.89*	0.83*	0.83*	-0.01	0.62	-0.85*	-0.78*	1					
Ca	-0.14	-0.47	0.95*	-0.8*	-0.38	0.87*	0.84*	0.85*	0.08	0.63	-0.82*	-0.76*	0.99*	1				
RM	0.42	-0.58	0.26	-0.84*	-0.32	0.46	0.79*	0.79*	-0.1	0.6	-0.12	-0.06	0.41	0.46	1			
BB	-0.34	0	0.67	-0.43	0.19	0.69	0.57	0.59	0.78*	0.7	-0.36	-0.56	0.57	0.64	0.33	1		
DHS	0.28	-0.1	-0.28	-0.21	0.36	0.15	0.43	0.42	0.1	0.19	0.39	0.07	-0.12	-0.1	0.62	0.15	1	

*Da* = Densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ); *CE* = Conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ); *MO* = Materia orgánica (%); *CO* = Carbono Orgánico (%); *N* = Nitrógeno total (%); *P* = Fósforo ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), *CIC* = Capacidad de intercambio catiónico [ $\text{Cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ ]; *Mg* = Magnesio [ $\text{Cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ ]; *K* = Potasio [ $\text{Cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ ]; *Ca* = Calcio [ $\text{Cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ ]; *RM* =  $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$  suelo; *BB* =  $\text{UFC} \times 10^3$ ; *DHS* = Enzima deshidrogenasa ( $\mu\text{g TPF g}^{-1}$ ).

\*Valores significativos ( $p < 0.05$ ).

El análisis de componentes principales (ACP) (Figura 1) mostró que 74.5 % de la variabilidad total de los datos se explicó por los componentes CP1 (52.1 %) y CP2 (22.4 %). Las variables con mayor peso en el CP1 fueron la capacidad de intercambio catiónico (0.32), el calcio (0.32), el carbono orgánico (0.32) y la materia orgánica (0.31) que presentaron correlaciones significativas (Cuadro 4) que influyen en la actividad biológica del suelo. Rosero *et al.* (2019) consignan resultados similares mediante un ACP, reconocieron que en suelos de bosque, pradera y un sistema silvopastoril el CP1 explica que 48.48 % de la variabilidad está determinada por la *CIC* (0.97) y el calcio (0.86); en tanto que en el CP2 (21.69 %) destacaron las partículas de arena y arcilla, el pH y N total.



**Figura 1.** Gráfico *biplot* de las propiedades del suelo en tres sitios del estado de Tlaxcala.

En suelos de bosque con vegetación nativa, Notaro *et al.* (2018) obtuvieron valores para el CP1 de 79.01 % por variables como la actividad enzimática, carbono de la biomasa microbiana y el CO del suelo, lo que se relaciona directamente con la MO y los procesos de humificación.

Además, el CP2 fue explicado por la partícula de arena (0.47), arcilla (-0.41), pH (-0.41) y N total (-0.41), asociándose a los valores de *Da* y MO. Álvarez-Arteaga *et al.* (2020) registraron 10.36 % de variabilidad asociada a la fracción mineral del suelo, densidad real, limo, arena y CIC. Lo anterior sugiere que las correlaciones e importancia de las variables del suelo pueden modificarse en función de las condiciones específicas de cada localidad. En los suelos de los sitios bajo estudio existe un predominio de la fracción arena, lo que implica una mayor infiltración; y con ello, una disminución de la capacidad de retención de agua que impacta en la



absorción por las raíces de las plantas, por lo tanto en la dinámica de la materia orgánica y actividad biológica del suelo (Díaz *et al.*, 2018).

García-Osorio *et al.* (2020) indican que a medida que se incrementa la edad de una reforestación, existirá una paulatina recuperación integral del ecosistema debido a que el proceso de incorporación de la *MO* aumenta hasta alcanzar cantidades similares al sitio original. Esta aseveración se refleja solo parcialmente en el presente estudio, ya que en SBM, a 40 años, existe una diferencia notable en la calidad edáfica con respecto a GDO y ZAC. Claramente, en SBM la especie arbórea establecida desempeña un papel relevante en la falta de recuperación de las propiedades del suelo, a diferencia de ZAC donde se tienen especies nativas y obras de conservación.

Con los resultados obtenidos, se confirma la relevancia de evaluar a través de las propiedades edáficas el impacto de establecer obras de conservación de suelo, ya que aportan información más detallada para una planificación y gestión de las obras y prácticas de conservación o recuperación del suelo.

## **Conclusiones**

La zanja bordo es la obra de conservación que, en conjunto con la vegetación nativa, produce una mejoría en la calidad del suelo en Gustavo Díaz Ordaz y Zacapexco; no así en San Bartolomé Matlalohcan, en donde después de más de 40 años el tipo de vegetación establecida en los trabajos de rehabilitación no han impactado positivamente en la calidad biológica del suelo.

El análisis de componentes principales permitió identificar que la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, calcio, pH, N total y la proporción de arcilla y arena son propiedades que influyen de manera importante en la calidad del suelo, por lo que el monitoreo de estas variables es útil para la evaluación del impacto del establecimiento de obras de conservación de suelo.

### **Agradecimientos**

Se agradece ampliamente el apoyo de los Ing. J. Nicolás G. y S. Zamora V., así como a los propietarios de los predios privados quienes proporcionaron la información básica de las obras de conservación y permitieron el acceso a los sitios para desarrollar el presente estudio.

### **Conflicto de intereses**

Los autores manifiestan no tener conflicto de interés.

### **Contribución por autor**

Elizabeth García Gallegos, Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha y Vidal Guerra De la Cruz: determinación de las variables, análisis de los datos, estructura del manuscrito; Francisco Javier Cocolletzi Pérez: muestreo en campo, determinación de las variables, captura y análisis de los datos.

## Referencias

- Álvarez-Arteaga, G., A. Ibáñez-Huerta, M. E. Orozco-Hernández y B. García-Fajardo. 2020. Regionalización de indicadores de calidad para suelos degradados por actividades agrícolas y pecuarias en el altiplano central de México. *Quivera Revista de Estudios Territoriales* 22(2):5-19. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40165706001>. (12 de enero 2021).
- Barajas G., G., D. Hernández R., S. Paredes G., J. C. Peña B. y J. Álvarez S. 2020. CO<sub>2</sub> microbiano edáfico en un bosque de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en la Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(57):108-131. Doi: 10.29298/rmcf.v11i57.552.
- Beltrán L., S., C. A. García D., C. Loredo O., J. Urrutia M., J. A. Hernández A. y H. G. Gámez V. 2018. "Llorón Imperial", *Eragrostis curvula* (Schrad) Nees, variedad de pasto para zonas áridas y semiáridas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 9(2):400-407. Doi: 10.22319/rmcp.v9i2.4532.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2012. Anexo técnico: Ejido Gustavo Díaz Ordaz. Gerencia estatal Tlaxcala: Conafor. Tlaxcala, Tlax., México. 15 p.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2015. Anexo técnico: Rancho Zacapexco. Gerencia estatal Tlaxcala: Conafor. Tlaxcala, Tlax., México. 18 p.
- Cotler, H., J. A. Lara, S. Cram, A. Guevara, ... and J. M. Núñez. 2022. Assessment of unintended effects of ditches on ecosystem services provided by Iztaccihuatl-Popocatepetl National Park, Mexico. *Acta Universitaria* 32:1-24. Doi: 10.15174/au.2022.3647.
- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez T. y V. Bunge. 2015. Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones Geográficas* (88):6-18. Doi: 10.14350/rig.47378.

- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez-Trinidad and E. Quintanar. 2013. Forest soil conservation in central Mexico: An interdisciplinary assessment. *Catena* 104:280-287. Doi: 10.1016/j.catena.2012.12.005.
- Díaz M., C., C. Herrera A. y K. Prada S. 2018. Características fisicoquímicas de suelos con relación a su conformación estructural. *Investigación e Innovación en Ingenierías* 6(1):58-69. Doi: 10.17081/invinno.6.1.2775.
- Doria T., O. A., D. O. Mendoza A., M. Gutiérrez G. y M. Pando M. 2022. Efecto de una obra de conservación de suelo en el patrón de distribución de la vegetación y funcionalidad del ecosistema. *E-CUCBA* 9(17):229-237. Doi: 10.32870/ecucba.vi17.230.
- Espinosa R., M., E. Andrade L., P. Rivera O. y A. Romero D. 2011. Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de Geografía* (53-54):77-88. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/143451/128731>. (13 de marzo de 2023).
- Fischer, Z. and L. Dubis. 2019. Soil respiration in the profiles of forest soils in Inland Dunes. *Open Journal of Soil Science* 9:75-90. Doi: 10.4236/ojss.2019.95005.
- Frugoni, M. C., G. Falbo y M. González M. 2020. Los suelos derivados de cenizas volcánicas en la provincia del Neuquén, Argentina. In: Imbellone, P. A. y O. A. Barbosa (Edits.). *Suelos y vulcanismo*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACCS). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, BA, Argentina. pp. 307-332. <http://www.suelos.org.ar/sitio/nuevo-libro-suelos-y-vulcanismo-argentina/>. (25 de marzo de 2021).
- García, C., F. Gil, T. Hernández y C. Trasar (Edits.). 2003. *Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, MD, España. 371 p.
- García-Osorio, M. T., F. O. Plascencia-Escalante, G. Ángeles-Pérez, F. Montoya-Reyes y L. Beltrán-Rodríguez. 2020. Producción y tasa de descomposición de

hojarasca en áreas bajo rehabilitación en El Porvenir, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 26(3):e2632099. Doi: 10.21829/myb.2020.2632099.

González-Romero, J., M. E. Lucas-Borja, P. A. Plaza-Álvarez, J. Sagra, D. Moya and J. De Las Heras. 2018. Temporal effects of post-fire check dam construction on soil functionality in SE Spain. *Science of the Total Environment* 642:117-124. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.052.

InfoStat. 2008. Infostat. Software Estadístico. Manual del usuario. Versión 2008. Editorial Brujas. Córdoba, Cba, Argentina, 334 p. [https://www.researchgate.net/publication/283491340\\_Infostat\\_manual\\_del\\_usuario](https://www.researchgate.net/publication/283491340_Infostat_manual_del_usuario). (10 de septiembre de 2021).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010a. Compendio de información geográfica municipal 2010 Terrenate, Tlaxcala. Clave geoestadística 29030. INEGI. Aguascalientes, Ags., México. 10p. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/29/29030.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/29/29030.pdf). (10 de junio de 2020).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010b. Compendio de información geográfica municipal 2010. Atlangatepec, Tlaxcala. Clave geoestadística 29003. INEGI. Aguascalientes, Ags., México. 10p. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/29/29003.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/29/29003.pdf). (10 de junio de 2020).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010c. Compendio de información geográfica municipal 2010. Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala. Clave geoestadística 29031. INEGI. Aguascalientes, Ags., México. 10p. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/29/29031.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/29/29031.pdf). (10 de junio de 2020).

- Khalaji, J., N. Gharahi and M. Pajouhesh. 2021. Investigating the effect of different water and soil conservation practices on some soil properties. *Environment and Water Engineering* 7(1):143-156. Doi: 10.22034/jewe.2020.248329.1425.
- Li, Z. and H. Fang. 2016. Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews* 163:94-117. Doi: 10.1016/j.earscirev.2016.10.004.
- Munguía, R., J. Beer, J-M. Harmand y J. Hagggar. 2004. Tasas de descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica* y hojas verdes de *Erythrina poeppigiana*, solas y en mezclas. *Agroforestería en las Américas* 41-42:62-68.  
[https://www.researchgate.net/publication/236649951\\_Tasas\\_de\\_descomposicion\\_y\\_liberacion\\_de\\_nutrientes\\_de\\_la\\_hojarasca\\_de\\_Eucalyptus\\_deglupta\\_Coffea\\_arabica\\_y\\_hojas\\_verdes\\_de\\_Erythrina\\_poeppigiana\\_solas\\_y\\_en\\_mezclas\\_Decomposition\\_and\\_nutrient\\_release\\_r](https://www.researchgate.net/publication/236649951_Tasas_de_descomposicion_y_liberacion_de_nutrientes_de_la_hojarasca_de_Eucalyptus_deglupta_Coffea_arabica_y_hojas_verdes_de_Erythrina_poeppigiana_solas_y_en_mezclas_Decomposition_and_nutrient_release_r). (20 de agosto de 2020).
- Murillo, W., W. Quiñones y F. Echeverri. 2005. Evaluación del efecto alelopático de tres especies de *Eucalyptus*. *Actualidades Biológicas* 27:105-108. Doi: 10.17533/udea.acbi.331568.
- Musco, A., M. R. Panuccio, C. Mallamaci and M. Sidari. 2014. Biological indicators to assess short-term soil quality changes in forest ecosystems. *Ecological Indicators* 45:416-423.  
[https://www.academia.edu/19596605/Biological\\_indicators\\_to\\_assess\\_short\\_term\\_soil\\_quality\\_changes\\_in\\_forest\\_ecosystems](https://www.academia.edu/19596605/Biological_indicators_to_assess_short_term_soil_quality_changes_in_forest_ecosystems). (11 de enero de 2019).
- Notaro, K. A., E. V. de Medeiros, G. P. Duda, K. A. Moreira, ... and W. da S. Moraes. 2018. Enzymatic activity, microbial biomass, and organic carbon of Entisols from Brazilian tropical dry forest and annual and perennial crops. *Chilean Journal of Agricultural Research* 78(1):68-77. Doi: 10.4067/S0718-58392018000100068.
- Reyes C., A., M. R. Martínez M., E. Rubio G., E. García M. y A. A. Exebio G. 2019. Impacto del sistema zanja bordo sobre la cobertura vegetal en pastizales de la

región Mixteca, estado de Oaxaca. *Terra Latinoamericana* 37(3):231-242. Doi: 10.28940/terra.v37i3.327.

Rosero, J., J. Vélez, H. Burbano y H. Ordóñez. 2019. Cuantificación de la respiración y biomasa microbiana en Andisoles del sur de Colombia. *Agro Sur* 47(3):15-25. Doi: 10.4206/agrosur.2019.v47n3-03.

Schweizer L., S. 2011. Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Instituto Nacional de innovación y transferencia en tecnología agropecuaria y Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, SJ, Costa Rica. 18 p. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P33-9965.pdf>. (20 de enero de 2020).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y Colegio de Postgraduados (Colpos). 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002. Colpos Campus Montecillo. Texcoco, Edo. Méx., México. 69 p. <https://www.researchgate.net/publication/307967321>. (11 de enero de 2019).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre de 2002. México, D. F., México. 73 p. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>. (20 de febrero de 2020).

Solís-Vargas, A., V. Martínez-Albán y R. Camacho-Herrera. 2021. Potencial de captura de carbono en plantaciones mixtas con *Araucaria hunsteinii* K. Schum. en la Zona Atlántica, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 18(42):8-16. Doi: 10.18845/rfmk.v16i42.5537.

Vázquez-Alvarado, R. E., F. Blanco-Macías, M. C. Ojeda-Zacarías, J. R. Martínez-López, ... y L. A. Háuad-Marquín. 2011. Reforestación a base de nopal y maguey para la conservación de suelo y agua. *Revista Salud Pública y Nutrición* 5:185-203.

<https://docplayer.es/17088854-Reforestacion-a-base-de-nopal-y-maguey-para-la-conservacion-de-suelo-y-agua.html>. (12 de septiembre de 2021).

Welemariam, M., F. Kebede, B. Bedadi and E. Birhane. 2018. Exclosures backed up with community-based soil and water conservation practices increased soil organic carbon stock and microbial biomass carbon distribution, in the northern highlands of Ethiopia. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 5:1-11. Doi: 10.1186/s40538-018-0124-1.

Yáñez D., M. I., I. Cantú S., H. González R., J. G. Marmolejo M., E. Jurado y M. V. Gómez M. 2017. Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 8(42):123-149. Doi: 10.29298/rmcf.v8i42.22.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.