

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE**



**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LAS OBRAS DE
CONSERVACIÓN DE SUELO EN TRES SITIOS DEL ESTADO DE
TLAXCALA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE**

PRESENTA

ING. FRANCISCO JAVIER COCOLETZI PEREZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE

DR. VIDAL GUERRA DE LA CRUZ

DR. OSCAR G. VÁZQUEZ CUECUECHA

TUTORAS

DRA. ELIZABETH GARCÍA GALLEGOS

DRA. ALINE LÓPEZ LÓPEZ



IXTACUIXTLA, TLAXCALA, JUNIO DE 2021.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRIA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Código:	505-RGE-04
Publicación:	Diciembre 2020
Revisión:	04

C. FRANCISCO JAVIER COCOLETZI PEREZ

PRESENTE

En cumplimiento al artículo 52 fracción "d" del Reglamento General de Evaluación Académica, el comité de evaluación de examen de grado ha revisado el trabajo de investigación titulado: "Evaluación del impacto de las obras de conservación de suelo en tres sitios del estado de Tlaxcala", realizado bajo la dirección del Dr. Vidal Guerra de la Cruz y del Dr. Oscar G. Vázquez Cuecuecha. No habiendo encontrado objeción alguna, se autoriza su impresión:

Dr. José Luis Martínez y Pérez

Dr. Vidal Guerra de la Cruz

Dr. Oscar G. Vázquez Cuecuecha

Dra. Elizabeth García Gallegos

Dr. José Jiménez López

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

"POR LA CULTURA A LA JUSTICIA SOCIAL"
Ixtacuixtla, Tlax., 25 de mayo de 2021.



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN GENÉTICA Y AMBIENTE**

DRA. EDELMIRA GARCÍA NIETO
COORDINADORA GENERAL DEL CIGyA Y POSGRADO



Documento exclusivo para uso de la dependencia responsable o autoridad correspondiente

En memoria del Dr. Mario Martínez Menes.

Destacado agrónomo, extensionista, profesor y maestro de vida de Chapingo.

En memoria de Erick Blancas, alumno de la UATx y amigo.
Que estés bien amigo, donde quiera que estés y tengas luz.

Agradecimientos

A mi alma mater, la Universidad Autónoma Chapingo, que me dio el conocimiento y las habilidades necesarias para hacer un posgrado.

Al Centro de Investigación en Genética y Ambiente y el posgrado, que me dieron los conocimientos y me formaron como ambientalista.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca número 924761.

Al Ingeniero Nicolás y al Biólogo Miguel por ayudarnos a realizar este estudio.

Agradezco al Comisariado Ejidal de Gustavo Díaz Ordaz y San Bartolomé Matlahohcan, así como a los encargados de Rancho Zacapexco por las facilidades otorgadas para realizar este trabajo.

Agradezco el apoyo de Marco A. Rogel del CCG-UNAM por la ayuda prestada para hacer los análisis biológicos de suelo.

Agradezco al laboratorio de Ecología Forestal del Centro de Ciencias Genómicas de la UNAM, al laboratorio de Ciencias Ambientales, de la Facultad de Química y del ICUAP de la BUAP, así como al laboratorio de Recursos Naturales del Departamento de suelos de Chapingo por las facilidades para realizar análisis de suelos necesarios para este trabajo.

Agradezco a los miembros del comité tutorial y de titulación, el Dr. Oscar G. Vázquez Cuecuecha, Dr. Vidal Guerra de la Cruz, la Dra. Elizabeth García Gallegos, la Dra. Aline López López, el Dr. José Luis Martínez y Pérez y el Dr. José Jiménez López por sus conocimientos, comentarios y su experiencia.

Agradecimientos personales

A Doña Carmen Arenillas. Abuelita, sigues presente aquí, aunque hayan pasado 16 años de tu partida.

A mi mamá, papá y hermana, por apoyarme en esta etapa de mi vida y estar ahí presentes. Les quiero mucho y sin ustedes no hubiera llegado tan lejos ni sería la persona que soy ahora.

A mis abuelas Consuelo y Alicia y mi abuelo Santos, gracias por su cariño, sus consejos y por preocuparse por mí. Les quiero.

Al Dr. Mario Martínez. Gracias por contagiarme el gusto por la conservación de suelos. Que esté bien y descansando donde sea que se encuentre en otro plano de la existencia.

A la Dra. Elizabeth, por apoyarme en este proyecto, por sus consejos, por su amistad, por no dejarme caer y por despertar mi amor por la edafología. Muchas gracias colega y ¡arriba Chapingo!

A la Dra. Aline, por escucharme cuando lo necesitaba, por su conocimiento y por sus consejos. Se le extraña.

Al Dr. Oscar, por dirigir este proyecto, apoyarme, ser paciente y por sus consejos. Sin usted esto no se hubiera concluido.

A la maestra Eunice, por sus consejos y por darme las bases para orientar este trabajo de una manera más integral y ecológica. Gracias

Al Dr. José Luis y al Dr. Vidal, por su apoyo logístico y técnico en este proyecto, así como a Oli, Raquel, Vic y demás personas que hicieron más amena la convivencia en el laboratorio. Gracias por su compañía, se les extraña.

A todo el personal académico y administrativo del CIGyA que apoyaron este proyecto directa o indirectamente. Muchas gracias por sus consejos y sus críticas constructivas.

Sobre todo, quiero agradecer a mis compañeros de la maestría y amigos:

Gracias Yare, por tu amistad, por las charlas, por nuestras sobremesas eternas y amenas con las pechugas crujientes, además del apoyo para mejorar esta tesis. Muchas gracias amiga, te extraño.

Gracias Gaby, por ser compañera de laboratorio, amiga y confidente. Se extraña tu sarcasmo y tu mala vibra en buena onda. Que buena fue tu compañía y los recalentados en el laboratorio. Se extrañan esos tiempos.

Gracias Hugo e Isa, por su compañía, su amistad, por las sobremesas y por compartir tantas pato aventuras, fuimos un equipo de primera. Les extraño mucho, amigos.

Gracias a Aimé, Paulina y Oscar, por el tiempo que convivimos y por su alegría y los momentos gratos que convivimos fuera de clases.

Gracias a Antonio y a Binicio, por su amistad, las salidas, las aventuras y en el caso de Toño, por ayudarme enseñarme a usar el laboratorio cuando era un aprendiz en las determinaciones. Extraño los viejos tiempos cuando convivíamos los tres. Amigos los quiero mucho y los extraño.

Gracias a Erick, que ha trascendido a otro plano de la existencia. Que tengas luz amigo. Tu vida se truncó muy rápido, pero dejaste huella en quienes te conocimos y te apreciamos por lo buena persona que eras. Aún quedó pendiente nuestra salida que ya no pudimos hacer, pero te hablo en mis pensamientos. Ojalá me escuches.

Finalmente me agradezco, por superar tantos imprevistos y tener paciencia.

ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XIII
I INTRODUCCIÓN	1
I.1 MARCO TEÓRICO	3
I.1.1 El suelo	3
I.1.1.1 Nutrimentos	5
I.1.1.2 Diversidad biológica del suelo y vegetal	6
I.1.1.3 Indicadores de la calidad del suelo	8
I.1.2 Degradación del suelo	8
I.1.2.1 Erosión del suelo	9
I.1.3 Erosión hídrica en Tlaxcala	10
I.1.4 Acciones de control de erosión: obras de conservación	11
Terrazas	11
Zanjas	11
I.1.5 Acciones para el control de la erosión y mejoramiento de la calidad del suelo en Tlaxcala	12
I.2 ANTECEDENTES	14
I.3 HIPÓTESIS	17
I.4 JUSTIFICACIÓN	17
I.5 OBJETIVOS	18
I.5.1 Objetivo general	18
I.5.2 Objetivos particulares	18
I.6 METODOLOGÍA	19
I.6.1 Área de estudio	19
I.6.1.1 Ejido Gustavo Díaz Ordaz	19
I.6.1.2 Zacapexco	21
I.6.1.3 San Bartolomé Matlahochan	23
I.6.2 Muestreo de suelo y preparación de las muestras	25
I.6.3 Muestreo de vegetación	28
	VI

I.6.4	Determinación de las propiedades del suelo	29
I.6.5	Parámetros de diversidad vegetal	30
I.6.6	Análisis de los datos	32
II	RESULTADOS	33
II.1	Gustavo Díaz Ordaz	33
II.1.1	Propiedades edáficas y contenido nutrimental	33
II.2	Zacapexco	35
II.2.1	Propiedades edáficas y contenido nutrimental	35
II.2.2	Familias de especies vegetales predominantes	37
II.2.3	Índices de diversidad de especies	39
II.2.4	Parámetros de la estructura arbórea	40
II.3	San Bartolomé Matlahohcan	44
II.3.1	Propiedades edáficas y contenido nutrimental	44
II.3.2	Familias de especies vegetales predominantes	46
II.3.3	Índices de diversidad de especies	48
II.3.4	Parámetros de la estructura arbórea	49
II.4	Relación de las propiedades edáficas y edáficas-vegetación	53
II.5	Agrupación de las propiedades edáficas	56
III	DISCUSIÓN	63
III.1	Propiedades edáficas y contenido nutrimental	63
III.2	Principales familias y especies	72
III.2.1	Estrato arbustivo y herbáceo	72
III.2.2	Estrato arbóreo	75
III.3	Índices de diversidad de especies	76
III.4	Parámetros de la estructura arbórea	80
III.5	Relación entre propiedades edáficas y vegetación	84
IV	CONCLUSIONES	89
V	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Propiedades determinadas en muestras de suelo con y sin obra de conservación	29
Tabla 2. Índices de diversidad determinados en el área con y sin obra de conservación de acuerdo a Moreno (2001)	30
Tabla 3. Parámetros estructurales del arbolado	31
Tabla 4. Análisis de varianza de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con y sin obra de conservación en el ejido Gustavo Díaz Ordaz	34
Tabla 5. Análisis de varianza de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con y sin obra de conservación en Zacapexco, Atlangatepec	36
Tabla 6. Listado de vegetación por familia, Zacapexco	38
Tabla 7. Análisis de los Índices de diversidad alfa en el sitio de Zacapexco	39
Tabla 8. Índices de diversidad beta (Sørensen), Zacapexco	40
Tabla 9. Estructura arbórea y valor de importancia de las especies arbóreas de sitios con y sin obra de conservación en Zacapexco	41
Tabla 10. Análisis de varianza de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con y sin obra de conservación en San Bartolomé Matlahohcan	45
Tabla 11. Listado de vegetación por familia, Matlahohcan	47
Tabla 12. Análisis de los índices de diversidad alfa, Matlahohcan	48
Tabla 13. Índices de diversidad beta (Sørensen), Matlahohcan	49
Tabla 14. Estructura arbórea y valor de importancia de las especies arbóreas de sitios con y sin obra de conservación en Matlahohcan, Tetla	50
Tabla 15. Correlación de Pearson entre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo.	54
Tabla 16. Correlaciones de Pearson entre las propiedades edáficas y de vegetación	55

Tabla 17. Análisis de componentes principales: Autovalores de las propiedades edáficas	56
Tabla 18. Análisis de componentes principales: Autovectores de las propiedades edáficas	57
Tabla 19. Análisis de componentes principales: Autovalores de las propiedades edáficas y parámetros de vegetación	59
Tabla 20. Análisis de componentes principales: Autovectores de las propiedades edáficas y parámetros de vegetación	60

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación del Ejido Gustavo Díaz Ordaz, Municipio de Emiliano Zapata	20
Figura 2. Ubicación de Zacapexco, municipio de Atlangatepec	22
Figura 3. Ubicación de Matlahohcan, municipio de Tetla	24
Figura 4. Cuadrantes dentro del Ejido Gustavo Díaz Ordaz	26
Figura 5. Distribución de los muestreos de vegetación	28
Figura 6. Clases de altura de los árboles de Zacapexco	42
Figura 7. Clases diamétricas de los árboles del sitio con obra de conservación, Zacapexco	43
Figura 8. Clases de altura de los árboles del sitio con obra de conservación, Matlahohcan	51
Figura 9. Clases diamétricas de los árboles del sitio con obra de conservación, Matlahohcan	52
Figura 10. Gráfico Biplot de las propiedades edáficas	58
Figura 11. Gráfico Biplot de las propiedades edáficas y parámetros de vegetación	62

RESUMEN

La degradación del suelo es la pérdida de su fertilidad y capacidad potencial para producir materiales vegetales en cantidad y calidad deseadas, como resultado de perturbaciones que causan erosión. En Tlaxcala, 48% de la superficie presenta erosión muy alta y para controlarla se han realizado obras de conservación, cuya finalidad es mejorar su calidad y propiciar la sobrevivencia de especies forestales, destacando las obras conocidas como zanja bordo y zanja trinchera. A pesar de que estas prácticas aún se llevan a cabo, no se ha medido su impacto en las propiedades edáficas y en la diversidad de especies vegetales en las zonas donde se han establecido. El objetivo de este estudio consistió en evaluar el impacto de diferentes obras de conservación de suelo a través de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como la diversidad de especies vegetales. Se seleccionaron para su evaluación tres sitios de estudio con diferentes obras y tiempo de construcción: Zacapexco (zanja bordo, 4 años), Gustavo Díaz Ordaz (zanja trinchera y zanja bordo, 7 años) y Matlalohcan (zanja bordo, 40 años), se compararon con un área sin intervención (testigo) dentro de la misma obra. Los resultados indican que todos los sitios presentan bajos contenidos de materia orgánica, C orgánico, P y baja actividad microbiana, pero media a alta CIC y bases intercambiables, consecuencia del material parental (tepetate). Zacapexco es el que mejor ha respondido a la introducción de la zanja bordo, respecto al testigo, en propiedades como densidad aparente (0.96 g cm^{-3}), materia orgánica (3.94%) y respiración microbiana (23.77 mg kg^{-1}); mientras que en Gustavo Díaz Ordaz y Matlalohcan aún no hay cambios significativos. Las especies vegetales identificadas muestran que Zacapexco aún se encuentra en fases iniciales de sucesión, debido a la baja diversidad ($H'=0.4$) y mayor dominancia de especies arbóreas ($\lambda=0.73$) y diversidad de arbustivas ($H'=2.95$). En Matlalohcan, la introducción de especies exóticas provocó mayor diversidad arbórea ($H'=1.99$; $\lambda=0.18$) y arbustiva ($H'=2.24$; $\lambda=0.16$), propia de estados sucesionales maduros; sin embargo, las especies exóticas establecidas como el eucalipto, disminuyeron la calidad edáfica, lo que provoca un estado sucesional desviado, que redujo el efecto positivo de la obra de conservación.

Palabras clave

Conservación de suelo, zanja bordo, zanja trinchera, propiedades edáficas, diversidad de especies.

ABSTRACT

Soil degradation is the loss of the potential capacity of soils to produce plant materials in desired quantity and quality, as the result of disturbances that lead to erosion. In Tlaxcala, 48% of the surface has very high level of erosion and to control it, soil conservation works have been carried out, the purpose of which is to improve soil quality and increase the survival of forest species, prevailing the border ditch and the trench ditch. Although these practices are still being carried out, their impact on edaphic properties and plant diversity in the areas where they have been established has not been measured. The objective of this study was to evaluate the impact of different soil conservation works through physical, chemical and biological properties of the soil, as well as the diversity of plant species. Three study sites with different works and construction time were selected for evaluation: Zacapexco (bord ditch, 4 years), Gustavo Díaz Ordaz (trench ditch and bord ditch, 7 years) and Matlalohcan (bord ditch, 40 years) and compared with plots without intervention within the same working areas serving as a control. Results indicate that all the sites have low contents of organic matter, organic C, P and microbial activity, but medium to high CEC and interchangeable bases, a result of the type of parent material (tepetate). In Zacapexco the board trench showed best responses in reference to the control, in properties such as apparent density (0.96 g cm^{-3}) organic matter (3.94%) and microbial respiration (23.77 mg kg^{-1}), while in Gustavo Díaz Ordaz and Matlalohcan changes are not significant. The plant species identified show that Zacapexco is in the initial stages of succession, due to its low diversity and greater dominance of tree species ($H' = 0.4$; $\lambda = 0.73$) and of shrub species ($H' = 2.95$). In Matlalohcan, the introduction of exotic species caused greater arboreal diversity ($H' = 1.99$; $\lambda = 0.18$) and shrub ($H' = 2.24$; $\lambda = 0.16$), typical of mature successional stages; however, established exotic species such as eucalyptus decreased the soil quality, causing a deviated successional trend that reduced the positive effect of the conservation works.

Keywords

Soil conservation, board ditch, trench ditch, edaphic properties, species diversity.

I INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo es considerada como la pérdida o reducción medible de la capacidad actual o potencial de los suelos para producir materiales vegetales de la cantidad y calidad deseadas (López, 2002). Esto puede ser resultado de causas naturales y/o antropogénicas, entre los que destacan la deforestación, sobreexplotación de la vegetación, cultivos itinerantes, cambio de uso de suelo, sobrepastoreo, factores topográficos y climáticos como tormentas, vientos de alta velocidad y lluvias de alta intensidad (Osman, 2014). Estos factores en conjunto ocasionan problemas como la erosión hídrica, la cual es la principal responsable de los cambios en el estado de salud del suelo llamado degradación (FAO, 1993); estos cambios provocan que cada vez se realicen menos funciones de las que se podría esperar, lo que conlleva a una disminución de rangos o estatus de diversas propiedades edáficas (Porta-Casanellas y López-Acevedo, 2008).

La FAO (2015) menciona que a nivel mundial la mayoría del recurso suelo se encuentra solamente en condición aceptable; sin embargo, las amenazas más significativas a la función suelo a escala global son la erosión, la pérdida del carbono orgánico y el desequilibrio de nutrimentos.

En el estado de Tlaxcala, Alvarado *et al.* (2007) determinó que la superficie afectada por erosión hídrica es considerada grave, con 446.70 Km² de erosión ligera (equivalente al 11% de la superficie), 771.57 Km² como moderada (19%), 893.45 Km² con erosión alta (22%) y 1,949.20 Km² como erosión muy alta (48%).

Para controlar estos grados de erosión se han realizado distintas acciones llamadas obras y prácticas de conservación, que buscan mejorar y recuperar la calidad de los suelos al disminuir la velocidad del escurrimiento, retener sedimentos y controlar el movimiento de partículas del suelo (Cisneros *et al.*, 2012). Entre la variedad de obras para recuperar suelos, se encuentran las usadas para mejorar las áreas agrícolas y su productividad como las terrazas, presas de piedra acomodada, barreras de piedra, presas de gaviones, cabeceos de

cárcavas, presas de morillos, entre otras, y las construidas para mejorar la calidad del suelo y sobrevivencia de las especies arbóreas, destacando las zanjas bordo y zanjas trinchera (CONAFOR, 2007).

En Tlaxcala han existido y existen diversos programas de conservación de suelo y agua, algunos de los cuales siguen vigentes, sin que se cuente con un registro preciso de la superficie intervenida ni del tipo de obra construida, y, por lo tanto, tampoco se ha podido medir su impacto en las zonas donde se han establecido. En la mayoría de los casos tampoco se ha evaluado este impacto la supervivencia de las especies forestales establecidas con las obras (CONAFOR, 2007). Asimismo, no se han tomado en cuenta las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, las cuales en conjunto juegan un papel fundamental para explicar la funcionalidad del ecosistema al estar relacionadas con las transformaciones del material orgánico y mineral a nutrimentos disponibles para las plantas para mejorar la calidad del suelo y su productividad (Cotler *et al.*, 2015). Para evaluar dicha calidad se ha recurrido al uso de indicadores que pueden ser medidos a través de sus propiedades edáficas, debido a que proporcionan datos numéricos sobre la capacidad de un suelo para llevar a cabo una o más funciones (Muñoz-Rojas *et al.*, 2016).

Son escasos los trabajos relacionados con la evaluación de las obras de conservación de suelo y su efectividad sobre el mejoramiento de las condiciones ambientales de las zonas donde fueron construidas, de ahí la importancia de conocer su impacto para generar información que ayude a la toma de decisiones de programas de conservación de suelo. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio consistió en evaluar el impacto de diferentes obras de conservación de suelo a través de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como la diversidad de especies vegetales.

I.1 MARCO TEÓRICO

I.1.1 El suelo

El suelo se define como un cuerpo natural formado a partir de materiales minerales y orgánicos (Soil Survey Staff, 1994), líquidos y gases que ocurren sobre la superficie de la Tierra, ocupan un lugar en el espacio y se caracterizan por contener una combinación vertical de horizontes o capas que se distinguen del material inicial como el resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia (Soil Survey Staff, 1998). La composición química y física del suelo están determinadas por el material geológico del que se origina, la cubierta vegetal, la meteorización, la topografía y los cambios artificiales derivadas de la actividad humana (INECC, 2007).

La calidad del suelo se debe entender como las funciones del suelo que promueven la productividad del sistema sin que decaigan sus propiedades físicas, químicas y biológicas (García *et al.*, 2012) y para analizarlas, se deben conocer ciertas propiedades dinámicas, como es el contenido de materia orgánica, la diversidad de organismos o productos microbianos, además de estar asociado con atributos como la fertilidad, la productividad potencial, sostenibilidad, calidad ambiental y el número de individuos que se pueden mantener en un área dada (Cruz *et al.*, 2004).

Dentro de las propiedades más importantes del suelo, están las físicas, como la textura, la cual se agrupa en tres clases de acuerdo al tamaño de las partículas de suelo: arena (0.05 a 2 mm), limo (0.05-0.002 mm) y arcilla (menos de 0.002 mm). Se relaciona con la aireación, movimiento de agua, retención de humedad, retención y liberación de iones, disponibilidad de nutrimentos, la productividad, erodabilidad, uso y manejo del suelo (Jaramillo, 2002). En segundo lugar de importancia se encuentra la densidad aparente, la cual se define como la masa por unidad de volumen que ocupa la muestra de campo, proporciona información sobre la compactación de cada horizonte e infiere sobre las dificultades para la

emergencia, enraizamiento y circulación de agua y aire (Porta-Casanellas y López-Acevedo, 2003).

Dentro de las propiedades químicas, el pH es el criterio más usado para juzgar si un suelo es ácido o alcalino, medido en una suspensión de suelo y agua (Ortiz-Solorio, 2019); mientras que la conductividad eléctrica se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina y es proporcional a la concentración de sales en solución. Una solución conduce electricidad en mayor grado cuanto mayor sea su concentración en sales, su unidad de medida es el dS m⁻¹. Los suelos con elevada conductividad eléctrica impiden el buen desarrollo de las plantas, debido a la alta concentración de sales (Soriano-Soto, 2018). En cuanto a la materia orgánica, se relaciona con varias características del suelo, favorece la formación de su estructura, tamaño y estabilidad de agregados, aumenta los macroporos, el volumen de aireación y circulación de aire, la infiltración y velocidad de drenaje, la capacidad de retener agua, la consistencia, el valor de la capacidad de intercambio catiónico y disminuye el encostramiento superficial, la susceptibilidad del suelo a la erosión (erodabilidad), el pH y aporta macro y micronutrientes, además de ser la principal fuente de energía para los macro y microorganismos que viven en el suelo (biota) entre otros (Jaramillo, 2002).

El carbono orgánico también es un elemento principal al ser un indicador de múltiples funciones del suelo, expresa la tasa de mineralización de la materia orgánica en un periodo determinado e indica también la actividad respiratoria y eficacia relativa de los microorganismos en los procesos de descomposición (Porta-Casanellas *et al.*, 2003) e igual representan mayor interés, dado que, dentro del carbono, está la fracción químicamente más activa (Porta-Casanellas y López-Acevedo, 2008). Para el caso de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se refiere a la cantidad de cationes que pueden ser intercambiados por unidad de peso en el suelo, y son muy importantes en relación con la nutrición de las plantas y en los procesos que tratan de evacuarlos del suelo, como la lixiviación, evitando que se pierdan nutrientes. Los cationes más importantes en

el proceso de intercambio catiónico son Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , y Na^{+} y NH_4^{+} (Ortiz-Solorio, 2019).

I.1.1.1 Nutrimentos

El suelo es el medio natural que proporciona a las plantas sostén físico, además de agua y nutrientes. No obstante, con frecuencia se encuentran en cantidades insuficientes para satisfacer los requerimientos de las plantas. Uno de los más importantes es el nitrógeno, el cual depende del contenido de materia orgánica en el suelo (Julca-Otiniano *et al.*, 2006), normalmente del 97 al 99% del nitrógeno total se encuentra en formas orgánicas muy complejas (Foth y Turk, 1985) que al mineralizarse libera nutrientes como el nitrógeno, encontrándose en el horizonte superficial del suelo, pero la erosión es un factor importante en su abatimiento, lo que repercute en el crecimiento de las plantas y en la actividad microbiana (Celaya-Michel y Castellanos-Villegas, 2011). Otro nutriente importante es el fósforo, el cual es superado por el nitrógeno en cuanto a frecuencia y magnitud de su deficiencia. Este nutriente se encuentra en el suelo en formas orgánicas e inorgánicas, este último como constituyente de minerales fosfatados, adsorbido a la fracción mineral u orgánica del suelo y en solución. El fósforo orgánico representa entre el 20 y 80% del total presente en el suelo y requiere de mineralización para pasar a formas aprovechables por las plantas u organismos, lo cual ocurre por la acción enzimática de fosfatasas (Núñez, 2007).

En cuanto al potasio, es el séptimo elemento más abundante en el suelo; la corteza terrestre contiene 2.6% y forma parte de los minerales de las rocas, representa del 90 al 98% del potasio total del suelo y aunque no es directamente aprovechable, constituye una reserva liberable mediante la intemperización (Moscatelli *et al.*, 2001; Núñez, 2007). La pérdida de potasio por erosión es más importante en la capa arable que en los estratos subyacentes, que contienen menores cantidades de este elemento (Do Prado y da Veiga, 1992). Al igual que el

potasio, el calcio se encuentra presente en diversos minerales como la calcita, dolomita, apatita y feldespatos cálcicos que al intemperizarse liberan calcio, elemento que varía en su requerimiento con la especie vegetal (Núñez, 2007). Respecto al magnesio constituye el 2.77 % de la corteza terrestre (Ortiz-Solorio, 2019) formando parte de minerales como la biotita, dolomita, entre otros, que al intemperizarse liberan magnesio a la solución del suelo, en donde puede ser lixiviado, absorbido por las plantas o microorganismos, y en el complejo de cambio (Núñez, 2007).

I.1.1.2 Diversidad biológica del suelo y vegetal

El suelo es el hábitat de una gran cantidad de organismos vivos de todo tipo; su pérdida de biodiversidad hace a los suelos más vulnerables a la erosión y otros procesos de degradación, por lo que la biodiversidad suele tomarse como indicador general del estado de salud del suelo; dentro ésta, es importante la medición de la degradación de la cubierta vegetal, ya que es un fiel reflejo del estado de degradación del suelo (Alonso *et al.*, 2011). Esta disminución de la diversidad vegetal acelera la reducción de múltiples servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas, como la producción de agua, fijación de CO₂, ciclos de materia y energía, productividad del suelo, entre otras (Ríos, 2011). Estudiar esta diversidad como parte del ecosistema debe tomar en cuenta la composición de especies (especialmente de los productores primarios), integridad ecológica en su estructura, funcionamiento (procesos) y salud ecológica como parte de su capacidad de recuperación de la biodiversidad posterior a un disturbio, en conjunto con los diferentes tipos de manejos derivados del mismo (Vargas, 2011).

En el suelo, también existen millones de organismos, desde los microscópicos hasta insectos y lombrices, los cuales forman parte de una comunidad viviente. Muchos de estos organismos y microorganismos degradan la materia orgánica, viven en la zona superficial del suelo (0 a 30 cm) y su abundancia disminuye con la profundidad (Tortora *et al.*, 2007); al terminar de degradarse esta materia

orgánica, se mejora la fertilidad y la productividad del suelo al liberarse carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, agua, oxígeno, calcio, magnesio, boro, cobre, manganeso entre otros para las plantas (Bonilla-Correa *et al.*, 2002).

Las propiedades biológicas y características bioquímicas del suelo, como la biomasa, respiración microbiana y la actividad enzimática, reaccionan rápidamente a cualquier cambio, y están directamente relacionadas con la población y la actividad de la microflora del suelo, así como aquellas que están directamente relacionadas con la cantidad y nivel de actividad en el suelo (Błońska y Januszek, 2013).

Las bacterias son las más numerosas y generalmente se estiman mediante recuentos en placa sobre medios de cultivo (Tortora *et al.*, 2007), aunque la respiración microbiana es también uno de los parámetros más usados para cuantificar la actividad microbiana del suelo. Esta característica ha permitido estimar la actividad general de la biomasa y cómo ésta es influida por factores abióticos, características edáficas y actividades agrícolas. El producto final arrojaría mediciones de CO₂ que permitirían conocer la mineralización y estabilidad del carbono en relación con la cantidad y calidad de la materia orgánica presente (Zagal *et al.*, 2002).

Otro factor es el proceso enzimático del suelo, el cual permite comprobar las reacciones químicas en los sistemas vivos, convirtiendo productos necesarios para el proceso de los ciclos biogeoquímicos, ya que los microorganismos del suelo liberan enzimas; la poca proporción de estas proteínas quedan inmovilizadas y estabilizadas en distintos componentes de la fase sólida del suelo (arcillas, moléculas orgánicas y complejos organominerales) (Ochoa *et al.*, 2007). Esta actividad juega un papel fundamental en la funcionalidad de los ecosistemas, ya que están directamente relacionadas con la transformación de formas complejas de carbono de la materia orgánica a nutrientes fácilmente disponibles para las plantas; entre las reacciones más estudiadas destacan las oxidorreductasas (deshidrogenasas, catalasas y peroxidasas) y las hidrolasas (fosfatasas, proteasas y ureasas) (Ochoa *et al.*, 2007). Estas reacciones

generalmente dependen de su relación con el pH, fuerza iónica, temperatura y presencia o ausencia de inhibidores (Burns, 1982 como se citó en Ochoa *et al.*, 2007).

I.1.1.3 Indicadores de la calidad del suelo

Los indicadores de la calidad del suelo son herramientas que miden y ofrecen información sobre las propiedades, procesos y características del suelo, son atributos medibles que muestran la funcionalidad del suelo al ambiente, además de dar información sobre el efecto del cambio en el uso de suelo y el impacto que tienen algunas prácticas sobre la degradación del suelo (Estrada-Herrera *et al.*, 2017); generalmente, se asocian a propiedades que influyen en la fertilidad del suelo, que deben abarcar atributos físicos, químicos y biológicos del suelo, ya que estos tienen una íntima relación entre sí y contribuyen activamente en la estabilidad del ecosistema (García *et al.*, 2012) y pueden dar una idea de los procesos biogeoquímicos y su variación en intensidad respecto al tiempo y espacio (Cruz *et al.*, 2004). Este uso de indicadores puede ser una herramienta eficaz para la toma de decisiones al ser sensibles en el corto, mediano y largo plazo y reflejar un diagnóstico sensible de la calidad de un suelo determinado (Estrada-Herrera *et al.*, 2017).

I.1.2 Degradación del suelo

La degradación del suelo se considera como la pérdida o reducción medible de la capacidad actual o potencial de los suelos para producir materiales vegetales de la cantidad y calidad deseada (López, 2002). Esto ocasiona que el ecosistema ya no pueda realizar sus funciones reguladoras ambientales de aceptar, almacenar y reciclar agua, energía y nutrientes, provocando que la productividad potencial asociada con un sistema de uso del suelo se vuelva no sostenible (Osman, 2014).

Esta pérdida de productividad biológica es causada por los sistemas de utilización del suelo o por un proceso o combinación de procesos antrópicos, que resultan en el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas, la pérdida duradera de la vegetación natural y la erosión del suelo causada por el viento o el agua (Alonso *et al.*, 2011).

I.1.2.1 Erosión del suelo

La erosión del suelo es un proceso natural o artificial mediante el cual las rocas y el suelo se desprenden y se trasladan de un lugar a otro, lo que llega a crear y transformar el paisaje al llenar valles, desgastar montañas y modificar los cauces de los ríos, sus fuerzas activas son el agua y el viento (Brown, 2019), junto con la combinación de varios factores como las pendientes pronunciadas, el clima, las características del suelo, su uso, la gestión, el tipo y el estado de la cubierta vegetal; y se acelera cuando el ecosistema es perturbado por las actividades humanas, como técnicas agrarias inadecuadas, cambios de uso de suelo, deforestación, entre otras (Alonso *et al.*, 2011).

Honorato (2000) indica que la principal forma de erosión es la hídrica, producida por la lluvia a través del golpeteo de sus gotas sobre la superficie del terreno, generando desprendimiento y arrastre de partículas y masas de suelo. La intensidad de la lluvia es el factor primordial del fenómeno. Este tipo de erosión da lugar a tres formas de erosión básicas:

- Erosión laminar. Consiste en una remoción de delgadas capas de suelo extendida más o menos uniformemente a toda una superficie, esta forma de erosión es la causa de grandes aportaciones de sedimentos a los cursos de agua y de una importante pérdida de fertilidad de los terrenos al afectar las partículas de suelo más finas.
- Erosión en surcos. Ocurre especialmente durante aguaceros de gran intensidad, los surcos son incisiones longitudinales en el suelo que aparecen como consecuencia de la concentración local del flujo superficial debido a las características locales del microrelieve.

- Erosión en cárcavas y barrancos. Consiste en profundas incisiones en el terreno originadas generalmente cuando existe una gran concentración de escorrentía en alguna zona determinada.

Los efectos de la erosión pueden ser variados y no notarse fácilmente; en primer lugar los materiales erosionados se transportan a lugares distantes, depositándose en cuerpos de agua como lagos, arroyos, ríos y en suelos agrícolas, para posteriormente generar sedimentación de tierras y de embalses, inundaciones, eutrofización de cuerpos de agua, contaminación de suelo y aguas (Osman, 2014) y suscitando en el suelo compactación y sellado, desequilibrio de nutrimentos, pérdida del carbono orgánico del suelo (COS), acidificación, salinización, y causando una disminución de su calidad y, en consecuencia, degradación química y biológica; esto provoca una modificación del microclima vinculado al suelo, pérdida de la biodiversidad y repercutiendo en la hidrología y la vegetación (FAO, 2015).

I.1.3 Erosión hídrica en Tlaxcala

Para Tlaxcala, Alvarado *et al.* (2007) determinaron el grado de erosión por el método de la FAO usando imágenes satelitales, fotografías aéreas y recorridos de campo con fotointerpretación, análisis visual e interpretación de patrones fotográficos. En él se ubica la superficie erosionada estatal de la siguiente manera: 446.70 Km² con erosión ligera (equivalente al 11% de la superficie); 771.57 Km² como moderada (19%); 893.45 Km² con erosión alta (22%); y 1,949.20 como erosión muy alta (48%), siendo un estudio más completo en comparación con otros más recientes, debido al uso de imágenes satelitales y a la verificación de los datos con puntos de muestreo.

I.1.4 Acciones de control de erosión: obras de conservación

Las prácticas de conservación buscan mejorar y recuperar la calidad de los suelos al tiempo que minimizan el proceso de erosión (Cotler *et al.*, 2015). Estas prácticas, son un conjunto de técnicas que abarcan desde la simple localización de las líneas de cultivo, hasta prácticas muy complejas como la nivelación completa de terrenos muy inclinados, con fines de implementar el uso agrícola. Su finalidad es disminuir la longitud de la pendiente para reducir la velocidad de escurrimiento, generar microrelieves superficiales para incrementar la retención y el almacenamiento superficial del agua, retener sedimentos que se mueven con el escurrimiento y controlar el movimiento de partículas por el viento (saltación) (Cisneros *et al.*, 2012).

Existen una cantidad importante de obras de conservación de suelos, cuya construcción dependerá de la función a desempeñar y las condiciones en las que se construirá. Destacan entre este tipo de construcciones diversos sistemas de terrazas y zanjas (Foster, 2013).

Terrazas

Se definen como los terraplenes formados entre los bordos del suelo, o la combinación de bordos y canales construidos en sentido perpendicular a la pendiente. Su objetivo es reducir la erosión del suelo, aumentar la infiltración del agua, acondicionándola para las labores agrícolas (Martínez *et al.*, 2009). Una variación de las mismas son las terrazas individuales, las cuales están hechas de forma circular, trazados en curva a nivel de un metro de diámetro en promedio. En la parte central se establece una especie forestal.

Zanjas

Consiste en el afloje, excavación o extracción y remoción de suelo realizado a cielo abierto, en áreas previamente localizadas y trazadas a curva de nivel. Destacan la zanja bordo, construidas siguiendo curvas de nivel, en donde el volumen de excavación se coloca aguas abajo para formar el bordo. Disponen de diques divisores para controlar la velocidad del flujo de agua. Su finalidad es

acondicionar el suelo degradado para facilitar el establecimiento de plantaciones forestales, incrementar su supervivencia, acelerar su desarrollo, evitar y controlar la erosión, retener el suelo de las escorrentías, captar agua de lluvia y retener y conservar la humedad (CONAFOR, 2007). Otra variación son las zanjas trincheras o tinas ciegas, que son una variación del sistema zanja bordo y consiste en interrumpir la continuidad de la construcción de zanjas dejando un tramo ciego cuyo valor o distancia depende de las condiciones de escurrimiento de la zona y se construyen de manera discontinua sobre una curva a nivel y perpendicular al terreno; generalmente las tinas tienen dimensiones de 0.4 m de ancho por 0.4 m de profundidad y 2 m de longitud. Ayudan a reducir la erosión hídrica, intercepta los escurrimientos superficiales, infiltra agua de lluvia, retiene azolves y humedad, favorece la reforestación para la sobrevivencia y desarrollo de especies vegetales (CONAFOR, 2007).

I.1.5 Acciones para el control de la erosión y mejoramiento de la calidad del suelo en Tlaxcala

Debido a las problemáticas generadas por la erosión, la construcción de obras de conservación de suelo se vuelve altamente recomendable para acelerar la restauración de áreas forestales degradadas, ante lo cual, México ha implementado estas estrategias para mitigar dichos problemas (Cintora, 2016). Para el caso de Tlaxcala, existen diversos programas de conservación de suelo y agua, sin embargo, no existe un registro preciso de la superficie intervenida ni el tipo de obras de conservación construidas.

El “Plan Tlaxcala para el combate a la erosión” (Secretaría de Agricultura y Ganadería, 1963) es de los primeros programas de conservación de suelos que se tengan registro; dividió al estado en cuatro zonas de trabajo para poder distribuir el apoyo: Huamantla, Tlaxco, Calpulalpan y Tlaxcala. Establecieron obras de conservación como terrazas de formación sucesiva, de banco, presas de control de azolves, zanjas a nivel, entre otros.

Otro programa que también tiene un impacto en la conservación de suelos en el estado es el programa COUSSA (Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua), operado por la SAGARPA hasta la actualidad. Este programa otorgó apoyos y servicios que permitió desarrollar sistemas integrales, obras, acciones y prácticas sustentables del suelo, agua y vegetación de las unidades productivas entre las que destacan plantaciones de especies nativas, repastización de agostaderos, terrazas de banco, terrazas de base ancha, angosta e individuales, tinas ciegas, surcado en contorno, zanjas bordos, obras de control de azolve, entre otras, aunque tampoco especifica los tipos de obras realizadas para cada municipio (Pickering, 2013).

PRONATURA también realiza prácticas de conservación y restauración de suelos en el estado para la recuperación de los bosques en sitios clave para la recarga de mantos acuíferos. El Informe de PRONATURA (2015) indica que se llevaron a cabo rehabilitación de cajetes, control de maleza, brechas cortafuego, reposición de arbolado y obras de conservación de suelo y agua.

La SEMARNAT desde el 2003, realizó acciones de conservación de suelo en la entidad a través de la CONAFOR, que es la encargada de operar el Programa Nacional Forestal; este programa tiene varias modalidades de apoyo en la cual se incorporó al programa de compensación ambiental, que tuvo como propósito llevar a cabo acciones de restauración de suelos, reforestación y mantenimiento de los ecosistemas forestales deteriorados causados por el cambio de uso de suelo para restaurar el ciclo hidrológico y ciclos biogeoquímicos, captura de carbono, recuperación de biodiversidad, entre otros, y cuyos programas en la actualidad siguen vigentes (CONAFOR, 2018).

Dependiendo del tipo de obra, la CONAFOR manejó un cálculo de costos aproximado por la realización de la obra por ha. Los costos aproximados para el caso de las terrazas individuales son de \$2,000.00 por ha, \$1,943.00 para las zanjas trinchera/tinas ciegas por ha, y \$1,940.00 en el caso de las zanjas bordos por ha al año 2012.

I.2 ANTECEDENTES

El primer antecedente del que se tiene conocimiento es de Jiménez-Barrios (2010) en la cual se evaluaron diferentes obras de conservación de suelos (terrazas, bordos, zanjas bordo, tinas ciegas y roturaciones, llevadas a cabo entre 1966 y 1974 en zonas agrícolas en el distrito de Coixtlahuaca, Oaxaca), respecto a zonas testigo o áreas que no fueron intervenidas con estas prácticas; se midieron diferentes propiedades del suelo, como textura, susceptibilidad al encostramiento, materia orgánica (0.74 y 1.4 %), carbono orgánico (0.43 y 0.81%), velocidad de infiltración, capacidad de retención de agua y la influencia de su construcción con relación a la disminución de los procesos erosivos de la zona. Los resultados, en la mayoría de los casos, arrojaron que estas prácticas producen diferencias favorables en su efecto sobre la mitigación de la erosión, pero no sobre el mejoramiento de las propiedades del suelo, lo cual puede ser explicado dadas las condiciones ambientales de la zona, al tener suelos someros de tipo Leptosol.

Cotler *et al.* (2015) evaluaron las prácticas de conservación de suelos forestales para el caso específico de las zanjas trinchera en siete estados de la República Mexicana (Tlaxcala, Guanajuato, Querétaro, Michoacán, Baja California Sur, Hidalgo y Guanajuato). El diseño de muestreo, al igual que el estudio anterior, consistió en comparar sitios con presencia de obras y sin éstas. Las muestras se tomaron en 28 sitios de siete estados, se caracterizó el medio físico (material parental, precipitación, pendiente, vegetación, rasgos de erosión, profundidad, tipo y textura de suelo) para después analizar la remoción de suelo, mineralización del carbono orgánico, dada en CO₂ derivado de la remoción y reacomodo del suelo para la construcción de las zanjas (0.5 a 2.5 ton ha⁻¹), densidad aparente (0.58 a 1.24 gcm⁻³), infiltración de agua, estabilidad del suelo, humedad a capacidad de campo, así como entrevistas a los dueños de los predios. Los resultados de este trabajo señalaron que la construcción de esta obra genera un gran número de impactos negativos en la emisión de CO₂ por la remoción de suelo como consecuencia de la excavación, no mejora las condiciones de retención de humedad necesarias para sostener la reforestación asociada a las zanjas y no son

adoptadas por los núcleos poblacionales; sin embargo, demuestran variaciones positivas en la infiltración de agua. Cabe destacar que dadas las diferentes condiciones geográficas en donde se desarrolló el trabajo de campo, los resultados y conclusiones de este estudio no se pueden tomar de manera homogénea, sino más bien de manera independiente.

González-Romero *et al.* (2018) evaluaron los efectos temporales de la construcción de presas de control de azolves de suelos en una región de España afectada por incendios forestales, en la cual se analizó su funcionalidad y efectos del suelo a lo largo del tiempo a través de propiedades físicas, químicas y biológicas en ocho represas en dos áreas semiáridas. Los resultados de este estudio indicaron que, al alterar el ciclo y el transporte de los sedimentos, las presas de control influyen en las principales propiedades físicas, químicas y biológicas entre la zona control y la zona con obra de conservación, tal como, la densidad aparente de 1.34 a 1 gcm⁻³, materia orgánica de 1.21 a 4.7%, conductividad eléctrica (80.9 a 189.3 μScm⁻¹), el pH de 8.81 a 8.39 y la actividad enzimática de la deshidrogenasa de 3.99 a 4.88 C g INTF g⁻¹, respectivamente.

Munive-Martínez *et al.* (2018) llevaron a cabo un estudio en Atlangatepec, Tlaxcala, en donde evaluaron el impacto de prácticas de rehabilitación con leguminosas (*Lupinus campestris*) sobre diversas características físico-químicas del suelo rizosférico donde se establecieron estas especies vegetales, en un sitio con obras de conservación de suelo (zanja trinchera y zanja bordo); sus resultados mostraron una mejoría de las propiedades edáficas antes y después de aplicar esta práctica, la materia orgánica se incrementó de 0.30 a 1%, la capacidad de intercambio catiónico [10.98 a 14.51 Cmol (+) kg⁻¹], N total (0.02 a 0.03%), P (2.93 a 3.67 mg kg⁻¹), K (2.15 a 3.6 mg kg⁻¹), Ca (13.63 a 19.43 mg kg⁻¹) y Mg (7.90 a 9.97 mg kg⁻¹).

Welemariam *et al.* (2018) realizaron un estudio en el norte de Etiopía que cuantificó el efecto de obras de conservación de suelo y agua (terrazas de piedra) en diferentes condiciones (terrazas con exclusión de ganado, sin exclusión, sitio sin terrazas con exclusión y zona de pastoreo comunal no conservada) sobre

algunas propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo. Sus resultados indican que hay mayores diferencias significativas entre el sitio con terrazas con exclusión, respecto a la zona de pastoreo comunal no conservado, en relación a propiedades como carbono orgánico (2.9 y 1.9%), densidad aparente (1.24 y 1.26 gcm⁻³) y carbono orgánico del suelo (29 y 16 mg ha⁻¹); sin embargo, en cuanto al carbono de la biomasa microbiana, el sitio con exclusión sin terrazas presentó mayores diferencias (640 mg C kg⁻¹ suelo), respecto a la zona de pastoreo comunal no conservada (370 mg C kg⁻¹ suelo).

Sánchez *et al.* (2019) evaluaron el efecto de las prácticas de restauración forestal post-incendio como barreras de material vegetativo muerto y acordonado sobre la recuperación de la vegetación en comparación con un sitio sin afectaciones de incendio y otro con afectación sin ninguna intervención, midiendo diversidad alfa (índice de Margalef, Shannon-Wenner y Simpson) y beta (índice de similaridad de Sørensen) para todos los sitios. Estos índices indican que los trabajos de restauración favorecieron la recuperación de los niveles de abundancia y riqueza 5 años después del incendio, ya que se alcanzan los valores de la zona no incendiada (Shannon 1.4, Simpson 0.6 y Margalef 0.7). Respecto a la similaridad entre tratamientos (diversidad beta), el estudio indica que existen diferencias significativas entre casi todos los tratamientos, a excepción de la comparación entre fajinas y acordonado, en donde no hay diferencias significativas y su similaridad media calculada con base en las especies vegetales presentes en cada zona de actuación disminuye (37.11 y 39.04%). Estos resultados y su análisis en este estudio permiten tener un conocimiento integral del efecto de las tareas de restauración sobre el suelo y la vegetación, lo cual es fundamental para conocer y detectar las sinergias que puedan darse por el deterioro de un ecosistema o por las compensaciones que puedan favorecer o acelerar la recuperación del mismo.

I.3 HIPÓTESIS

Por el alto porcentaje de erosión en los suelos del estado de Tlaxcala, se han establecido las obras de conservación de suelos como zanja trinchera y zanja bordo, tendrán una repercusión en la retención de humedad, sedimentos y aumento de la materia orgánica, impactando de forma positiva en las propiedades fisicoquímicas, biológicas del suelo y en la diversidad de especies vegetales.

I.4 JUSTIFICACIÓN

Tlaxcala es una entidad con un alto grado de erosión hídrica con relación a su superficie: 11% de erosión ligera (446.70 km²), 19% moderada (771.57 km²), 22% alta (893.45 km²) y 48% como muy alta (1949.20 km²) (Alvarado *et al.*, 2007); esto llevó a la necesidad de crear programas gubernamentales que mitigaran estos daños a inicios de los años 70's, se promovió el establecimiento de diversas obras de conservación, particularmente terrazas, bordos, zanjas bordo, tinas ciegas/zanjas trinchera, entre otras, acciones que han disminuido o detenido los procesos erosivos en suelos agrícolas, forestales y con potencial del mismo. Pero, dado que la única forma de evaluar estas obras ha sido mediante la supervivencia de las especies vegetales, no existe a la fecha información que refleje una mejora en la calidad del suelo, lo que hace latente la necesidad de evaluar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como la diversidad vegetal, debido a que, en conjunto, juegan un papel fundamental para explicar la funcionalidad del ecosistema al estar directamente relacionadas con las transformaciones de material orgánico y mineral a nutrientes fácilmente disponibles para las plantas, y por ende, mejorar la calidad del suelo y diversidad de especies vegetales. Con esta información se podrá valorar el impacto de dichas acciones a lo largo del tiempo y las relaciones que tienen entre las diversas propiedades a analizar para conocer el estado de rehabilitación en el cual se encuentran los sitios. Esta información es indispensable para orientar futuros programas de restauración de suelos en las diferentes regiones del estado donde se tenga este tipo de problemas.

I.5 OBJETIVOS

I.5.1 Objetivo general

Evaluar el impacto de las obras de conservación del suelo establecidas en tres condiciones de degradación (Zacapexco, Gustavo Díaz Ordaz y San Bartolomé Matlalohcan) a través de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como de diversidad vegetal, para generar información acerca del efecto de las obras como parte del proceso de rehabilitación.

I.5.2 Objetivos particulares

Evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de las obras de conservación para determinar su calidad.

Analizar la estructura y diversidad vegetal dentro de los sitios donde se establecieron las obras de conservación de suelo.

Analizar las posibles relaciones de las propiedades edáficas con la estructura y diversidad vegetal en las obras de conservación de suelo.

I.6 METODOLOGÍA

I.6.1 Área de estudio

I.6.1.1 Ejido Gustavo Díaz Ordaz

El ejido se localiza en el municipio de Emiliano Zapata, al norte del estado de Tlaxcala. La zona de estudio se encuentra en las coordenadas 19° 33' 50.37" N y 97° 58' 26.09" O. El municipio colinda al norte con el municipio de Tlaxco y el estado de Puebla; al este con el estado de Puebla y el municipio de Terrenate; al sur con los municipios de Terrenate y Lázaro Cárdenas; al oeste con los municipios de Lázaro Cárdenas y Tlaxco. Se ubica en el Eje Neovolcánico, subprovincia de Lagos y Volcanes del Anáhuac. Sus topoformas están conformadas por laderas escarpadas (79%), lomerío de tobas (13%) y meseta basáltica escalonada de lomerío (8%). El intervalo de temperatura es de 12 a 14°C en promedio, 600 a 800 mm de precipitación anual y el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (84%), semifrío subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad (9%) y templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (7%). Su geología está conformada por rocas ígneas extrusivas (97%) y brecha sedimentaria (2%). El suelo predominante es del orden Phaeozem (63%) y Leptosol (36%). Para el uso de suelo y vegetación predomina bosque (50%) la agricultura (41%), zona urbana (8%), pastizal (1%) (INEGI, 2009b).

La superficie total del ejido es de 470 ha de uso común, y el proyecto donde se establecieron las obras de conservación fue en 110 ha del paraje denominado "Peña del Chivo" en el año 2012; el sitio tiene pendientes del 15 al 30%, su uso forestal y el nivel de degradación es moderado, causado por deforestación. En 30 de las 110 ha del paraje se establecieron zanjas trincheras y zanjas bordo de manera manual, con un costo total de \$170,760.00 y \$168,960.00, respectivamente (CONAFOR, 2012) (Figura 1); sin embargo, ambas obras no fueron distribuidas de manera homogénea sino irregular, debido a la pendiente de

la zona y a su difícil acceso, por lo que se encontraban intercaladas en varias zonas de la superficie intervenida.

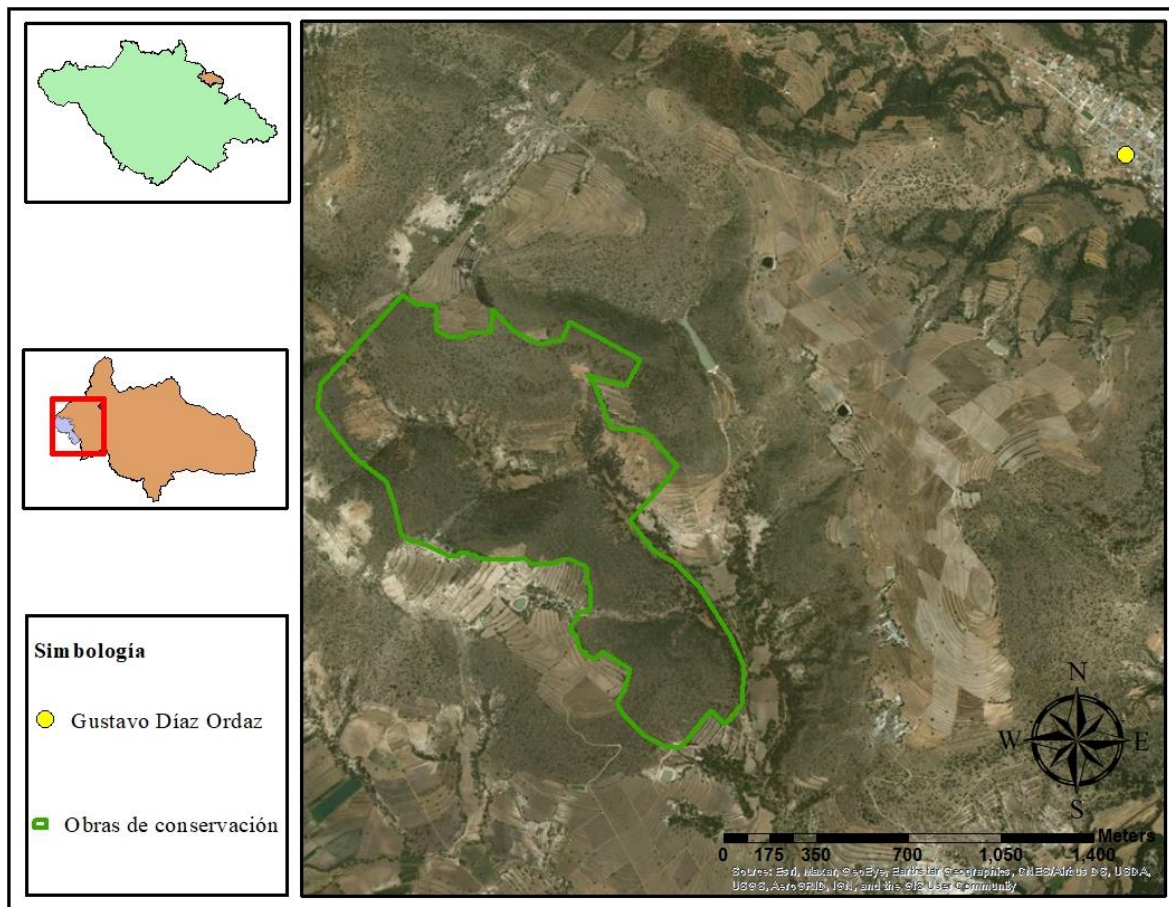


Figura 1. Ubicación del Ejido Gustavo Díaz Ordaz, Municipio de Emiliano Zapata.

I.6.1.2 Zacapexco

El sitio se ubica en la comunidad de San Pedro Ecatepec, en el municipio de Atlangatepec, al norte del estado de Tlaxcala. El sitio de estudio se encuentra en las coordenadas 19° 32' 31.6" N y 98° 08' 58.0" O. Ocupa el 2.87% de la superficie estatal, con una cota entre los 2480 y 2600 msnm. Se encuentra en el eje Neovolcánico, en la subprovincia fisiográfica de los lagos y volcanes del Anáhuac, con un sistema de topoformas de llanuras con lomeríos. Sus tipos de rocas son ígneas extrusivas (10.23% basalto, 1.12% brecha volcánica básica, 0.29% dacita, 74.88% toba ácida y 3.56% de suelo aluvial). El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media, con un intervalo de temperatura promedio entre 12 y 14°C. Su precipitación promedio anual varía de los 600 a 700 mm. El orden de suelo dominante es el Phaeozem con 54% de la superficie municipal, 32% Durisol y 4.06% Vertisol. El 76.02% de la superficie es agrícola, 8.70% pastizal, 5.01% bosque y 0.35% Tular (INEGI, 2009a).

El sitio a evaluar está dentro del paraje “Zacapexco” de propiedad privada, en la que se establecieron 40 ha de zanja bordo y 50 ha de terrazas individuales en el año 2015 con un costo de \$296,00.00 y \$298,000.00, respectivamente. Cuenta con una pendiente del 15 al 20%, con escasa cobertura forestal. El origen de la degradación de suelos de la zona donde se construyeron las obras fue por sobrepastoreo y posterior erosión hídrica de tipo laminar; el arrastre de sedimentos por estos factores es en dirección hacia la Presa de Atlangatepec (CONAFOR, 2015) (Figura 2).

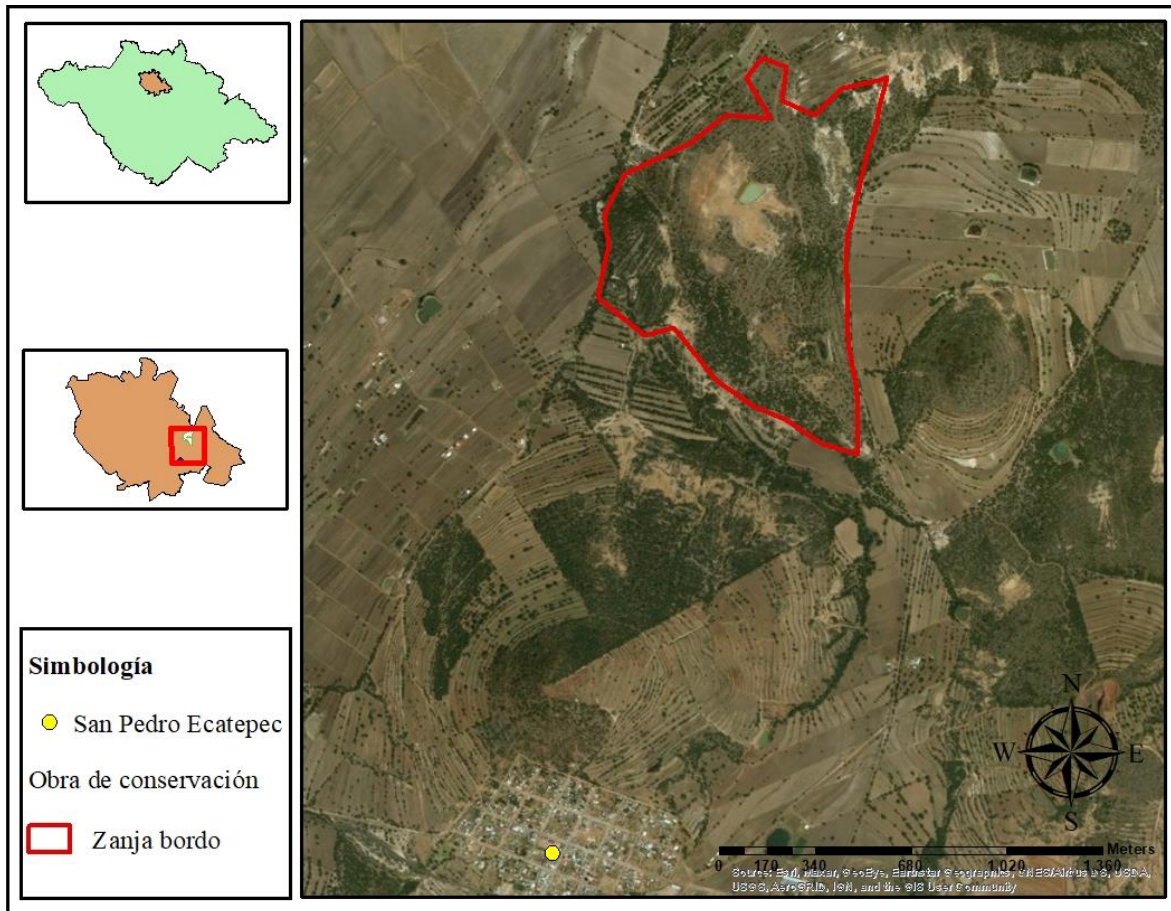


Figura 2. Ubicación de Zacapexco, municipio de Atlangatepec.

I.6.1.3 San Bartolomé Matlalohcan

La comunidad se ubica dentro del municipio de Tetla de la solidaridad; la zona intervenida se localiza en las coordenadas 19°28'11.68" N y 98°7'16.65" O. Dentro del eje Neovolcánico, tiene un sistema de topoformas de llanura con lomeríos de piso rocoso o cementado, llanuras aluviales y mesetas basálticas escalonadas con lomeríos de tobas. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, precipitaciones entre 600 y 900 mm al año e intervalos de temperaturas entre 12 y 14°C anual. Predominan los suelos del orden Phaeozem (62%), Vertisoles (13%) y Durisoles (2%); el tipo de roca predominante es la ígnea extrusiva del tipo toba ácida (65%) y suelo aluvial (14%); el uso de suelo es predominado por la agricultura (50%), zona urbana (21%), bosque (20%) y pastizal (9%) (INEGI, 2009c). En este sitio se construyeron 7 ha de zanja bordo y terrazas entre los años 1978 y 1976 como parte de proyectos de parcelas experimentales del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Figura 3).

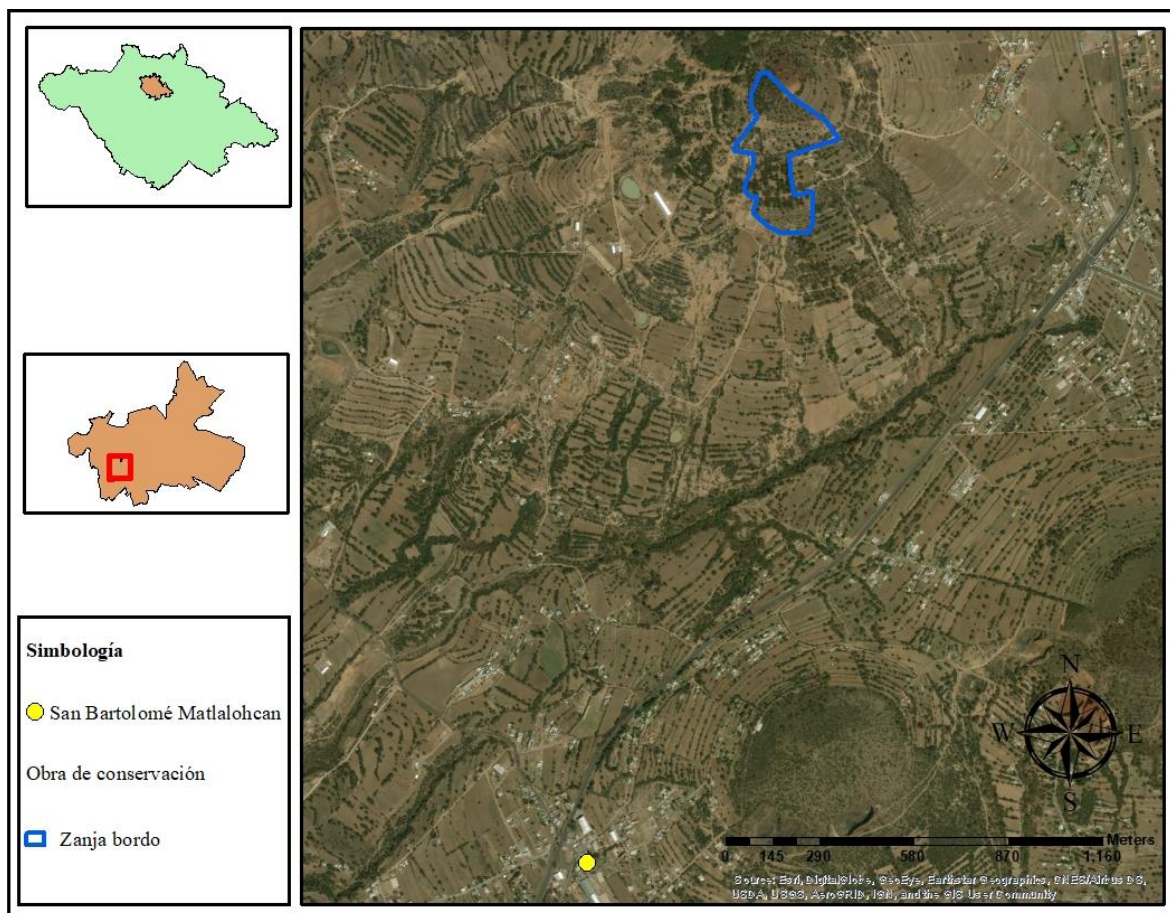


Figura 3. Ubicación de Matlahocan, municipio de Tetla.

I.6.2 Muestreo de suelo y preparación de las muestras

En específico para el ejido Gustavo Díaz Ordaz se aplicó un muestreo sistemático, debido a que este muestreo se lleva a cabo en superficies de cualquier tamaño y se puede tomar la muestra a partir de un punto inicial determinado al azar, a partir del cual se establece cierta distancia para ubicar los demás puntos. Se trazó una cuadrícula sobrepuesta a toda la superficie y el tamaño de cada cuadro fue determinado por la siguiente fórmula.

$$C = (a/n)^{1/2}$$

Donde:

C=Longitud de los lados de cada uno de los cuadros (m)

a=Superficie con obras de conservación (30 ha)

n=12 (número de puntos en 1 ha, de acuerdo a la NMX-AA-132-SCFI-2006)

$\frac{1}{2}$ = Constante

El resultado arrojó cuadrantes de 158 m x 158 m, lo que equivale a 2.5 ha, en total se trazaron 71 cuadrantes dentro de las 30 ha, sólo donde fueron establecidas las obras de conservación (Figura 4).

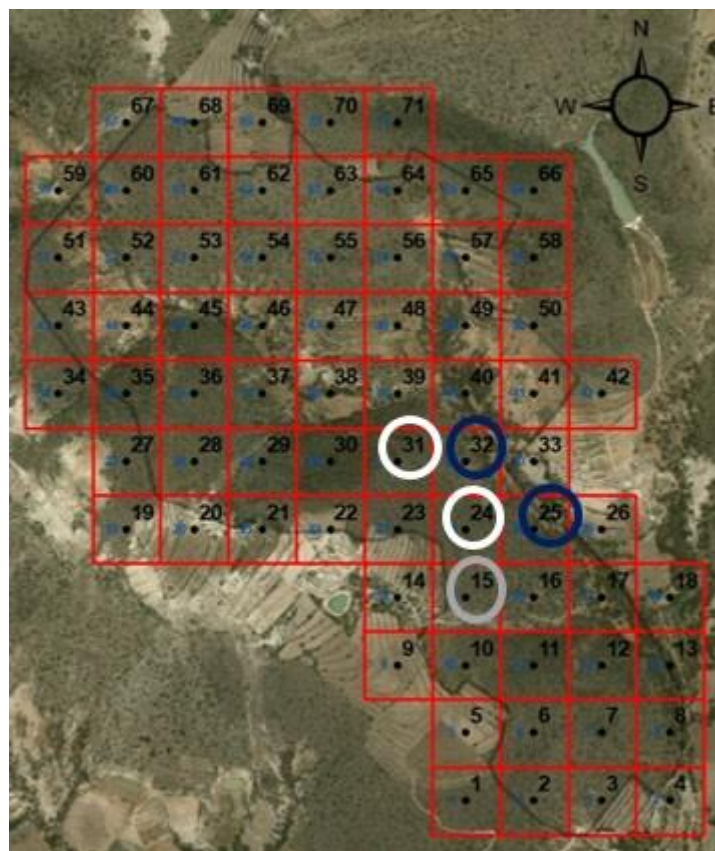


Figura 4. Cuadrantes dentro del Ejido Gustavo Díaz Ordaz. Círculo color blanco = zanja bordo; Círculo color azul = zanja trinchera; Círculo color gris = Zona testigo.

Una vez trazada la cuadrícula se procedió a realizar la visita a campo para ubicar los cuadrantes, se observó una irregularidad en cuanto a la distribución de las obras de conservación y aunado a la complejidad de la zona y pendiente se consideraron los cuadrantes 32 y 25, en donde se estableció la obra zanja trinchera y el 31 y 24 con zanja bordo. El cuadrante 15 fue seleccionado como zona testigo (sin obras de conservación).

Posteriormente cada uno de los cuadrantes con obra fue dividido en tres secciones con dirección a la pendiente. En cada sección se tomaron tres muestras simples de suelo por el método del zig-zag a una profundidad de 0-30 cm, en total 36 muestras para zanja bordo y trinchera. En la zona testigo se realizó la división en dos secciones para obtener seis muestras simples.

En Zacapexco y San Bartolomé Matlalohcan el muestreo de suelo fue en zig-zag, se escogió al azar el punto de partida para definir los siguientes puntos de

muestreo, tal como lo señala la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). Se encontró una irregularidad en cuanto a la distribución de las obras de conservación de suelo y en la superficie de las mismas. Para Zacapexco se muestrearon 3 ha con zanja bordo y 1 ha para la zona testigo. En esta zona se obtuvieron nueve y cinco muestras simples, respectivamente, a una profundidad de 0-30 cm. En San Bartolomé Matlalohcan se muestrearon 1.5 ha en la zona con zanja bordo y 0.5 ha en la zona testigo, con nueve muestras simples cada una. Para ambos lugares, la zona testigo se ubicó en un área adyacente a la obra de conservación que no tuviera influencia de dichas construcciones.

Todas las muestras de suelo fueron trasladadas al laboratorio para realizar muestras compuestas por el método del cuarteo, y las destinadas para realizar los análisis microbiológicos se almacenaron a 4 °C para inhibir la actividad microbiana y mantenerlas hasta la determinación de los parámetros biológicos del suelo (Daglio *et al.*, 2005). En total para el ejido Gustavo Díaz Ordaz se obtuvieron 12 muestras compuestas por cuadrante y dos en zona testigo. Para Zacapexco 3 muestras compuestas con obra y dos en zona testigo. En el caso de Bartolomé Matlalohcan se realizaron seis muestras compuestas (tres con obra y tres en zona testigo).

El resto de suelo de cada una de las muestras simples se colocó en papel Kraft para secarse a temperatura ambiente y a la sombra, después se llevó a cabo el proceso de molienda, tamizado en una malla de 2 mm para homogeneizar el tamaño de partícula, tal como lo establece la NOM-021 (DOF, 2002), se almacenó a temperatura ambiente hasta realizar las determinaciones correspondientes.

I.6.3 Muestreo de vegetación

En San Bartolomé Matlalohcan y Zacapexco para las zonas con zanja bordo y testigo, se empleó el método de transectos variables y cuadrantes (Mostacedo y Fredericksen, 2000) el cual consistió en contar, dentro de cuadrantes establecidos a lo largo de un transecto la cantidad de individuos por especie; en el caso del estrato arbóreo, se obtuvieron variables adicionales como altura total, diámetro del tallo y diámetro de copa mayor y menor de cada individuo. Este método indica una distancia de 200 m para el transecto y una longitud diferenciada para los cuadrantes del estrato arbóreo, la cual es de 10 x 10 m y tres cuadrantes; para el sotobosque, cinco cuadrantes de 2 x 2 m. La distribución de los cuadrantes a lo largo del transecto se hizo de manera aleatoria por el método de cuadrante centrado en un punto (Mitchell, 2010) a una distancia mínima de 5 m entre cuadrantes para eliminar la posibilidad de contabilizar una planta dos veces (Figura 5).

Para el estrato arbóreo y sotobosque se identificaron hasta nivel de género mediante las claves taxonómicas de Calderón y Rzedowski (2001).

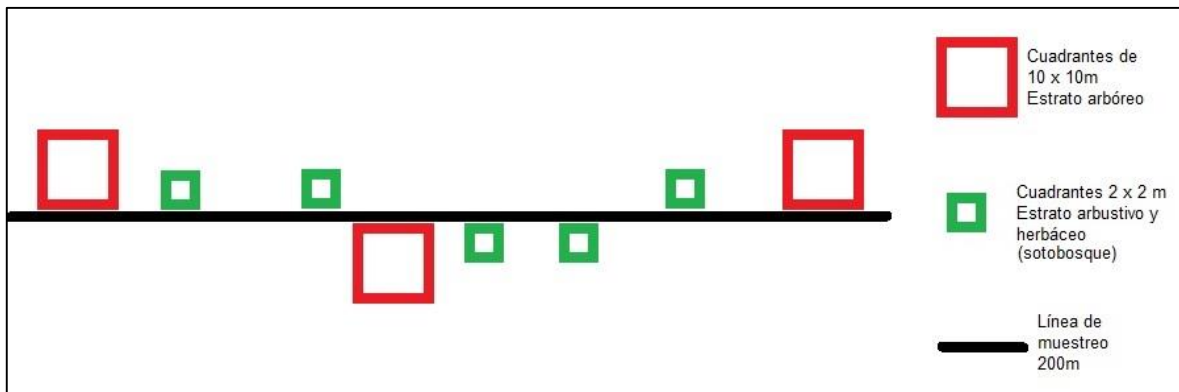


Figura 5. Distribución de los muestreos de vegetación.

I.6.4 Determinación de las propiedades del suelo

Las propiedades físicas, químicas y biológicas se determinaron (Tabla 1) para conocer la condición del suelo actual, monitorear el impacto del antes y el después de la intervención y decidir si las obras de conservación mejoran la calidad del suelo (Etchevers, 1999).

Tabla 1. Propiedades determinadas en muestras de suelo con y sin obra de conservación.

	Propiedad	Método	Referencia
Físicos	Clase textural	Bouyoucos	NOM-021-SEMARNAT-2000
	Densidad aparente	Método de la probeta	NMX-FF-109-SCFI-2007
	pH	Relación 1:2 p/v	NOM-021-SEMARNAT-2000
	Conductividad eléctrica	Medición electrolítica	Álvarez-Sánchez y Marín-Campos (2011)
	Materia orgánica	Oxidación en húmedo con dicromato de potasio	NOM-021-SEMARNAT-2000
Químicos	Carbono orgánico	Oxidación en húmedo con dicromato de potasio	NOM-021-SEMARNAT-2000
	Capacidad de intercambio catiónico	Titulación con EDTA	Juárez <i>et al.</i> (2009)
	Nitrógeno total	Kjeldahl	Bremer (1965)
	Fósforo aprovechable	Bray y Kurtz 1	NOM-021-SEMARNAT-2000
	Calcio, Magnesio y Potasio	Acetato de amonio 1N pH 7	NOM-021-SEMARNAT-2000
	Actividad microbiana	Incubación en medio cerrado (CO ₂)	Zagal <i>et al.</i> (2002)
Biológicos	Enzima deshidrogenasa	Incubación de suelo en 2,3,5-Cloruro de Trifenil Tetrazolium	Casida Jr. <i>et al</i> (1964)
	Biomasa bacteriana	Recuento por plaqueo	Muñoz-Rojas <i>et al.</i> (2016)

Fuente: Elaboración propia

I.6.5 Parámetros de diversidad vegetal

Los índices de diversidad vegetal se midieron y analizaron por sitio con sus respectivas obras con zanja bordo y el testigo; los índices de diversidad alfa se emplearon para evaluar la diversidad de especies dentro de las comunidades y determinar la equidad de especies dentro del sitio. Asimismo, se midió la diversidad beta para conocer el intercambio de especies entre el área con obra de conservación y el testigo como parte del reemplazamiento de especies o cambio biótico (Moreno, 2001) (Tabla 2), causado por las prácticas de conservación de suelo. Cabe destacar que los índices se analizaron, diferenciando las especies del estrato arbóreo y sotobosque (Mostacedo y Fredericksen, 2000).

Tabla 2. Índices de diversidad determinados en el área con y sin obra de conservación de acuerdo a Moreno (2001).

Tipo de diversidad	Índice	Método
Alfa	Shannon-Wiener	$H' = -\sum p_i \ln p_i$
	T de Hutchinson	$H_p = \frac{(N \log N) - (\sum f_i \log f_i)}{N}$
	Simpson	$\lambda = \sum p_i^2$
Beta	Similitud de Sørensen	$I_s = \frac{2c}{a + b}$

En el caso de la estructura de las especies arbóreas presentes, se analizaron por sitio y zona de estudio; se midió el diámetro normal de los individuos, diámetro de copa mayor y menor, y altura para poder obtener diversos parámetros estructurales (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros estructurales del arbolado.

Parámetro	Fórmula/Método	Referencia
Cobertura arbórea (elipse) (m ² h ⁻¹)	$\frac{(\pi * \text{Diámetro mayor} * \text{Diámetro menor})}{4}$	Matteucci y Colma (1982)
Área basal (m ² h ⁻¹)	$\pi \frac{DN^2}{4}$	González (2006)
Clases diamétricas	(Especie / individuos)	-----
Densidad (Individuos h ⁻¹)	-----	-----
Clases de alturas	Gráfica de barras (Especie / individuos)	-----
Índice de valor de importancia (IVI)	Dominancia relativa + Densidad relativa + Frecuencia relativa	Curtis y McIntosh (1951)

I.6.6 Análisis de los datos

Los datos de las propiedades edáficas se sometieron a un análisis de varianza unifactorial y una prueba de Tukey ($p = 0.05$). Previamente se determinaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. Los datos se analizaron bajo un modelo lineal:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

μ = promedio general

τ_i = efecto del i-ésimo tratamiento

ε_{ij} = error experimental

La correlación Pearson se llevó a cabo ($p \geq 0.05$) para las propiedades edáficas y edáficos-vegetativos; posteriormente se efectuó un análisis de componentes principales para conocer la contribución de las propiedades edáficas y los edáficos-vegetativos; esto se llevó a cabo con el Software estadístico Infostat versión 2008.

II RESULTADOS

II.1 Gustavo Díaz Ordaz

II.1.1 Propiedades edáficas y contenido nutrimental

En las propiedades físicas, existe un predominio de la fracción arena con 73% en promedio; mientras que, la densidad aparente fue menor a 1 g cm^{-3} en ambos suelos, con obras y sin obra (testigo), además, no hubo diferencias significativas (Tabla 4).

Respecto a las propiedades químicas, el pH se clasifica como moderadamente ácido y sin diferencias entre los tratamientos, del mismo modo el contenido de materia orgánica y C orgánico, siendo porcentajes bajos de acuerdo a la NOM-021 y, con base a Fassbender y Bornemisza (1987), el C orgánico en los suelos de la zanja trinchera y testigo es bajo (1.2 a 2.9%) y medio para la zanja bordo (2.9 a 4.6%). Esto no es así para la CIC, la cual tuvo un valor muy alto en los suelos de la zanja bordo y testigo, y alta para la zanja trinchera (Tabla 4). En cuanto a la concentración de N total, existieron diferencias entre los tratamientos, su valor fue bajo en la zanja bordo y zanja trinchera, no así en el testigo, que obtuvo un valor medio (0.30-0.80%). Para P, y las bases intercambiables como Ca, Mg y K, no se tuvieron diferencias entre los suelos bajo estudio.

Las propiedades biológicas (Tabla 4), arrojaron que la actividad microbiana no presentó diferencias entre los suelos de las obras de conservación y el testigo, al igual que en la enzima deshidrogenasa; pero en cuanto a la biomasa bacteriana, se tuvieron diferencias significativas respecto al testigo, el cual tiene la mayor población de bacterias en comparación con los suelos de la zanja bordo y trinchera.

Tabla 4. Análisis de varianza de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con y sin obra de conservación en el ejido Gustavo Díaz Ordaz.

Parámetro	Significancia	Zanja bordo	Zanja trinchera	Testigo	Referencia*
Arena	P = 0.1955	71.9 ± 1.04 a	73.1 ± 1.07 a	75.76 ± 1.8 a	Franco arenoso
Arcilla	P = 0.1846	5.94 ± 0.62 a	6.61 ± 0.64 a	4.28 ± 1.07 a	
Limo	P = 0.3362	22.1 ± 0.96 a	20.28 ± 0.9 a	19.96 ± 1.6 a	
Da (g cm ⁻³)	P = 0.4839	0.94 ± 0.02 a	0.92 ± 0.02 a	0.91 ± 0.02 a	
pH	P = 0.4926	6.27 ± 0.11	6.09 ± 0.12	6.06 ± 0.20	5.1 - 6.5
CE (dS m ⁻¹)	P = 0.8187	0.06 ± 0.0024 a	0.06 ± 0.0042 a	0.06 ± 0.0025 a	< 1
MO (%)	P = 0.6423	5.10 ± 0.42 a	4.53 ± 0.44 a	4.87 ± 0.8 a	4.1 - 6.0 Bajo
CO (%)	P = 0.6423	2.96 ± 0.25 a	2.62 ± 0.25 a	2.82 ± 0.47 a	1.2 – 2.9 Bajo** 2.9 – 4.6 Medio**
CIC [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.5700	45 ± 4.01 a	38.9 ± 4.12 a	43.5 ± 6.94 a	
N total (%)	P ≤ 0.0001	0.16 ± 0.01 b	0.12 ± 0.01 c	0.39 ± 0.01 a	< 0.30 Bajo
P [mg kg ⁻¹]	P = 0.8333	8.37 ± 1.15 a	9.15 ± 1.15 a	10.69 ± 1.63 a	< 15 Bajo
Ca [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.0526	7.55 ± 0.04 a	5.6 ± 0.04 a	6 ± 0.05 a	5 - 10 Media
Mg [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.1250	2.4 ± 0.14 a	1.8 ± 0.14 a	2 ± 0.2 a	1.3 - 3.0 Media
K [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.6250	0.40 ± 0.04 a	0.45 ± 0.04 a	0.4 ± 0.05 a	0.3 - 0.6 Media
CO ₂ (mg kg ⁻¹ suelo)	P = 0.3725	23.35 ± 1.34 a	21.39 ± 1.38 a	23.93 ± 2.33 a	-----
Deshidrogenasa (µg TTC g ⁻¹ suelo)	P = 0.7954	0.51 ± 0.09 a	0.47 ± 0.09 a	0.42 ± 0.11 a	-----
UFC x 10 ³ (g ⁻¹ suelo)	P = 0.0021	1142 ± 108.28 b	845 ± 98.85 b	1820 ± 171.21 a	-----

Letras iguales por fila indican que no hay diferencias significativas ($p \geq 0.05$). Media de Tukey ± E.E.

*NOM-021-SEMARNAT-2000 **Fassbender y Bornemisza (1987).

II.2 Zacapexco

II.2.1 Propiedades edáficas y contenido nutrimental

Con relación a las propiedades físicas, predomina la fracción arena con un promedio de 75% (Tabla 5), en tanto que la densidad aparente presenta diferencias entre los tratamientos (suelos), aunque según la NOM-021 es el suelo de la zanja bordo el que presenta ligeramente un valor adecuado (0.96 g cm^{-3}) con relación a la zona testigo (1.03 g cm^{-3}).

En las propiedades químicas (Tabla 5), se presentan diferencias significativas en el pH, no así en la conductividad eléctrica; para materia orgánica y C orgánico se tuvieron diferencias significativas, para ambas propiedades en cantidad mayor en la zanja bordo, respecto al testigo. Las propiedades donde no hubo diferencias se encuentran la CIC, el N total, P, Ca, Mg y P. Con relación a su clasificación dentro de la NOM-021, en ambos suelos de las zonas se presentaron efectos despreciables de salinidad, valores muy bajos de materia orgánica, bajos para N total y P aprovechable, medios para Ca, Mg y K, y altos y muy altos de CIC; en el caso del C orgánico, el porcentaje es bajo en la zanja bordo y muy bajo en el testigo (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Con relación a las propiedades biológicas del suelo (Tabla 5), se presentan diferencias significativas en cuanto a la actividad microbiana y en la actividad de la enzima deshidrogenasa, la cual es mayor en la obra de conservación de suelo, respecto al testigo; sin embargo, no se presentan estas diferencias en la biomasa bacteriana.

Tabla 5. Análisis de varianza de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con y sin obra de conservación en Zacapexco, Atlangatepec.

Parámetro	Significancia	Zanja bordo	Testigo	Referencia*
Arena	P = 0.0118	78.86 ± 2.07 a	68.58 ± 2.78 b	Franco arenoso
Arcilla	P = 0.0205	7.67 ± 2.44 a	15.77 ± 1.82 b	
Limo	P = 0.2185	13.47 ± 1 a	15.65 ± 1.35 a	
Da (g cm ⁻³)	P = 0.0907	0.96 ± 0.02 a	1.03 ± 0.03 a	
pH	P = 0.0319	7.55 ± 0.16 b	8.24 ± 0.12 a	7.4 - 8.5
CE (dS m ⁻¹)	P = 0.6218	0.04 ± 0.01 a	0.04 ± 0.01 a	< 1
MO (%)	P = 0.0031	3.94 ± 0.38 a	1.61 ± 0.5 b	< 4.0 Muy bajo
CO (%)	P = 0.0031	2.28 ± 0.22 a	0.93 ± 0.29 b	< 1.2 Muy bajo** 1.2 – 2.9 Bajo**
CIC [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.1566	30.58 ± 1.24 a	27.45 ± 1.66 a	25 - 40 Alta
N total (%)	P = 0.1613	0.23 ± 0.04 a	0.27 ± 0.05 a	< 0.30 Bajo
P (mg kg ⁻¹)	P = 0.4593	8.03 ± 0.78 a	7 ± 0.95 a	< 15 Bajo
Ca [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.3815	8.8 ± 1.98 a	5.6 ± 2.42 a	5 - 10 Media
Mg [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.4086	2.8 ± 0.66 a	1.8 ± 0.81 a	1.3 - 3.0 Media
K [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.1000	0.3 ± 0.00 a	0.4 ± 0.00 a	0.3 - 0.6 Media
CO ₂ (mg kg ⁻¹ suelo)	P = 0.0045	23.77 ± 1.46 a	15.29 ± 1.95 b	-----
Deshidrogenasa (µg TFF g ⁻¹ suelo)	P = 0.0025	2.41 ± 0.11 a	0.05 ± 0.12 b	-----
UFC x 10 ³ (g ⁻¹ suelo)	P = 0.7245	1047.78 ± 133.65 a	971.67 ± 163.69 a	-----

Letras iguales por fila indican que no hay diferencias significativas (p ≥ 0.05). Media de Tukey ± E.E.

*NOM-021-SEMARNAT-2000, **Fassbender y Bornemisza (1987).

II.2.2 Familias de especies vegetales predominantes

En las familias presentes en el sotobosque (Tabla 6) se observa una mayor predominancia de especies de la familia Poaceae y Asteraceae entre ambas zonas de estudio, presentándose las poáceas en mayor cantidad en el testigo respecto a la zanja bordo, con porcentajes superiores al 60 y 49, respectivamente; en el caso de las Asteráceas, en los dos tratamientos su porcentaje es cercano al 18%. Otras especies que destacan en la zanja bordo en porcentajes inferiores al 10% son las pertenecientes a la familia Oxalidaceae, Cyperaceae y Pteridaceae, mientras que en la zona testigo destaca por debajo del 5% la familia Fabaceae.

Las familias en el estrato arbóreo, se identificaron Pináceas y Cupresáceas, en mayor cantidad estas últimas en la zona con zanja bordo, aunque en ambos tratamientos el porcentaje de especies de esta familia supera el 80% de la totalidad de la vegetación arbórea (Tabla 9).

Tabla 6. Listado de vegetación por familia, Zacapexco.

Estrato/Familia	Testigo		Zanja bordo	
	No. de Individuos	Porcentaje del total	No. de Individuos	Porcentaje del total
Sotobosque				
Poaceae	226	63.1	123	49.2
Asteraceae	67	18.7	44	17.6
Oxalidaceae	7	2.0	21	8.4
Cyperaceae	7	2.0	16	6.4
Pteridaceae	1	0.3	14	5.6
Iridaceae	5	1.4	11	4.4
Plantaginaceae	3	0.8	4	1.6
Rubiaceae	6	1.7	4	1.6
Acanthaceae	0	0.0	3	1.2
Rubiaceae	5	1.4	3	1.2
Juncaceae	0	0.0	2	0.8
Commelinaceae	0	0.0	1	0.4
Convolvulaceae	1	0.3	1	0.4
Dugesiiidae	0	0.0	1	0.4
Fabaceae	17	4.7	1	0.4
Rosaceae	0	0.0	1	0.4
Cactaceae	1	0.3	0	0
Caprifoliaceae	5	1.4	0	0
Euphorbiaceae	4	1.1	0	0
Osmundaceae	1	0.3	0	0
Verbenaceae	2	0.6	0	0
Total	358	100	250	100
Arbóreo				
Cupressaceae	33	82.5	35	87.5
Pinaceae	7	17.5	5	12.5
Total	40	100	40	100

II.2.3 Índices de diversidad de especies

La riqueza para el estrato arbóreo de la zona con Zanja bordo y el testigo es de tres especies, esto repercute en el índice de equidad de Shannon-Wiener y su prueba estadística (t de Hutchinson), la cual indica que no hay diferencias significativas entre tratamientos ($p>0.05$). Para la vegetación del sotobosque, se presenta un número similar de especies para la zanja bordo (38) y el testigo (37); en este estrato, el índice es similar para ambos tratamientos. Al hacer su prueba estadística, el valor indica que no hay diferencias ($p>0.05$) entre el sitio con la obra de conservación y el testigo (Tabla 7).

En referencia al índice de dominancia de Simpson (Tabla 7), el estrato arbóreo presenta un mayor valor en la zanja bordo, respecto a la zona testigo, en el cual, para los dos casos es elevado e indica mayor dominancia y menor equitatividad de especies. En lo que respecta al sotobosque, el valor de la zanja bordo vuelve a ser ligeramente mayor con respecto a la zona testigo, aunque el valor para ambos tratamientos es bajo, por lo que hay poca dominancia y mayor equitatividad de las especies vegetales.

Tabla 7. Análisis de los Índices de diversidad alfa en el sitio de Zacapexco.

Estrato	Sitio	Significancia	N*	S**	Shannon-Wiener	t de Hutchinson	t tablas ($p=0.05$)	Simpson
Arbóreo	Zanja bordo	$P \geq 0.05$	40	3	0.490	0.424	1.990	0.739
	Testigo		40	3	0.568			0.699
Sotobosque	Zanja bordo	$P \geq 0.05$	250	38	2.95	0.534	1.965	0.085
	Testigo		358	37	2.902			0.082

*Número de especies, **Riqueza de especies

Para el índice de Sørensen (Tabla 8) en el estrato arbóreo se presenta una similitud del 66% entre las especies en común de la zona con zanja bordo y testigo, mientras que, en las especies del sotobosque la similitud es del 45%, lo que indica mayor diferencia de especies en este estrato en comparación con el arbóreo.

Tabla 8. Índices de diversidad beta (Sørensen), Zacapexco.

Grupo 1	Grupo 2	Similitud	
		Arbóreo	Sotobosque
Zanja bordo	Testigo	0.667	0.453

II.2.4 Parámetros de la estructura arbórea

Dentro del sitio con y sin obra de conservación de suelo se presentan algunas especies forestales compartidas. *Juniperus deppeana* tiene una densidad mayor de individuos por ha en la zona con zanja bordo que el testigo, no así para cobertura y área basal, la cual es mayor en el sitio testigo (Tabla 9). Para el índice de valor de importancia, los valores fueron similares. Otra especie que está presente en ambos tratamientos del sitio es *Pinus pseudostrobus*, que a pesar de presentar la misma densidad en la zanja bordo y en el testigo, esta última zona presenta valores mayores de cobertura y área basal, aunque el valor de importancia en ambos casos es similar. Las especies que no estuvieron presentes en ambos tratamientos, es el *Cupressus* spp. se presenta únicamente en la zanja bordo, mientras que el *Pinus greggi* se encuentra en la zona testigo.

Tabla 9. Estructura y valor de importancia de las especies arbóreas de sitios con y sin obra de conservación en Zacapexco.

Especie/ Sitio	Frecuencia (%)	Densidad (Ind ha ⁻¹)	Cobertura (m ² ha ⁻¹)	Cobertura (%)	Área basal (m ² h ⁻¹)	Área basal (%)	IVI*
Zanja bordo							
<i>Juniperus deppeana</i>	85	1133	2885.90	94.96	6.004	98.07	225.93
<i>Pinus pseudostrobus</i>	12.5	167	48.77	1.60	0.072	1.17	56.53
<i>Cupressus spp.</i>	2.5	33	104.46	3.44	0.046	0.75	17.54
Testigo							
<i>Juniperus deppeana</i>	82.5	1100	5922.18	95.43	12.272	97.92	223.28
<i>Pinus pseudostrobus</i>	12.5	167	190.33	3.07	0.168	1.34	56.69
<i>Pinus greggii</i>	5	67	93.20	1.50	0.093	0.74	20.02

*Índice de valor de importancia (IVI)

Para la distribución de alturas del testigo (Figura 6), la mayoría de los individuos se distribuye en las clases 0 y 5 m, predomina *Juniperus deppeana* con 28 individuos y de *Pinus greggii* menos de dos individuos; árboles mayores a 5 m, solo se presentan 5 individuos. En el sitio con obra de conservación (Figura 6) la mayor concentración de individuos se da en la clase de altura de 1 - 5 m, predomina *Juniperus deppeana* con 33 individuos, además de estar presentes en las clases de 10 m.

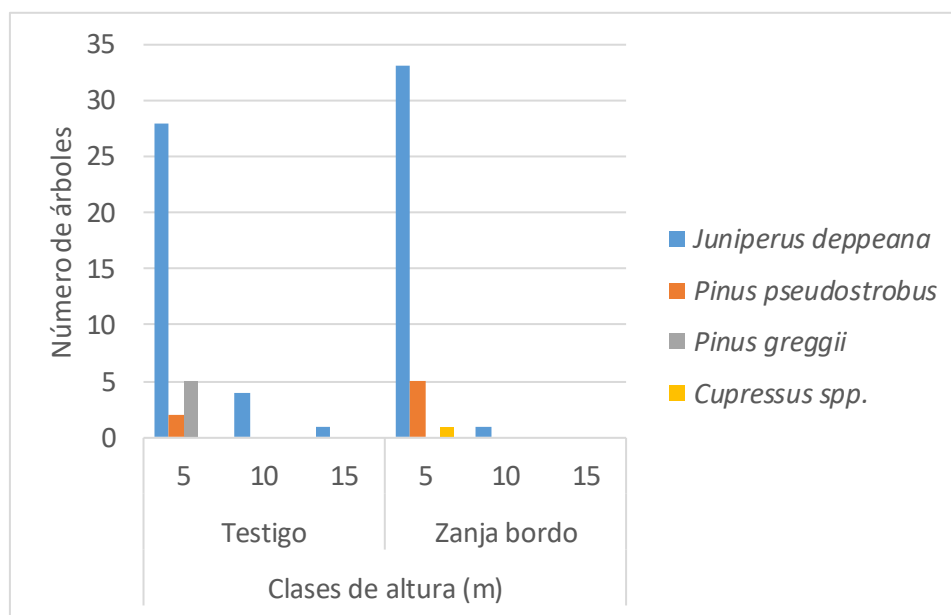


Figura 6. Clases de altura de los árboles de Zacapexco.

Para la clasificación de diámetros en el testigo, la mayoría de los individuos se distribuye en la clase menor a 5 cm, con predominancia de *Juniperus deppeana* con 31 individuos y en cantidad menor *Pinus pseudostrobus* con cinco. En cuanto a la zanja bordo, la concentración mayor de especies se presenta en las clases diamétricas menores a 5 cm, en donde el *Juniperus deppeana* tiene 27 individuos, y en menor cantidad *Pinus pseudostrobus* con cinco, aunque hay presencia de *Juniperus* en diámetros por arriba de los 25 cm, aunque en cantidades menores a los tres individuos (Figura 7).

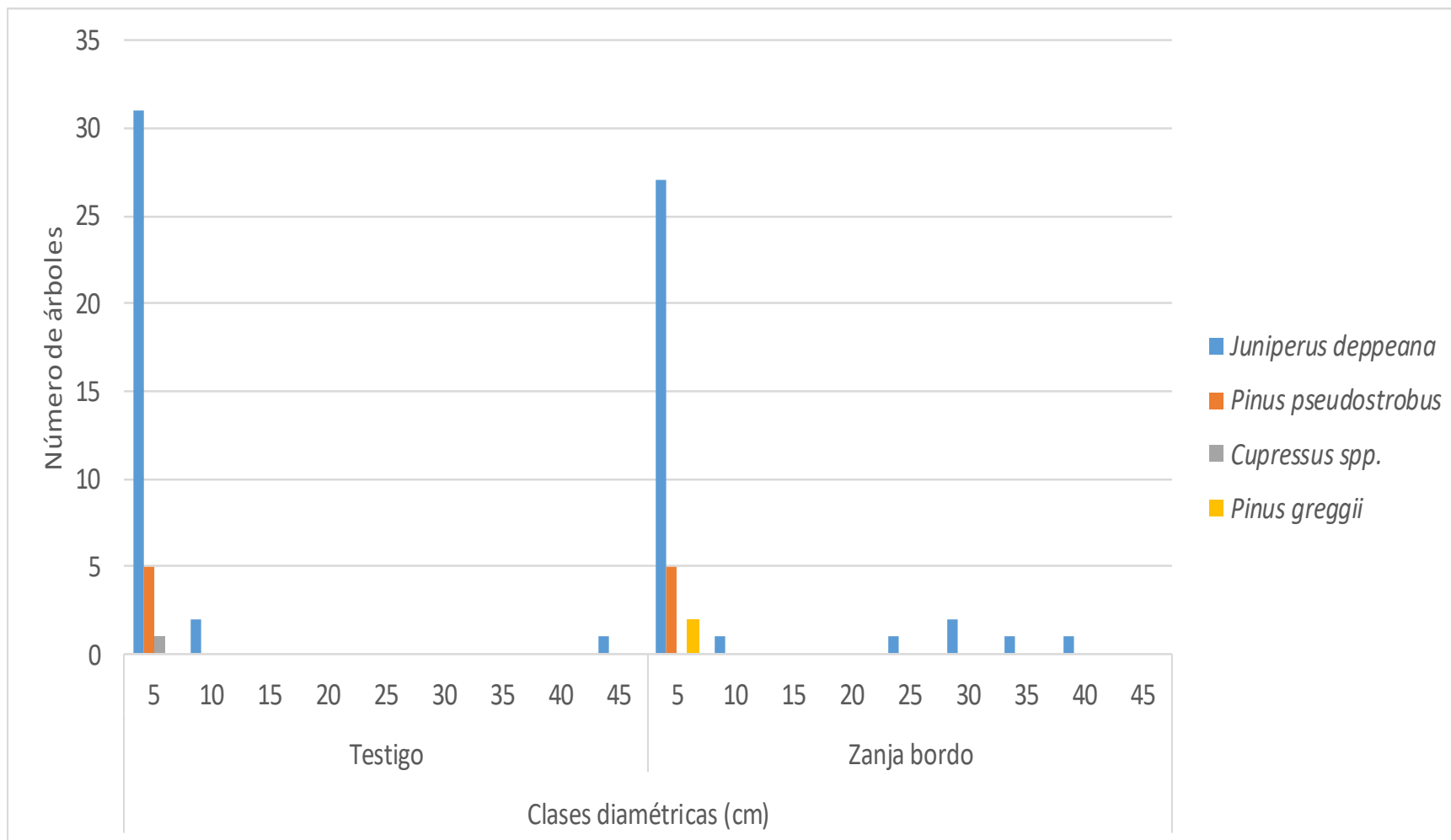


Figura 7. Clases diamétricas de los árboles del sitio con obra de conservación, Zacapexco.

II.3 San Bartolomé Matlalohcan

II.3.1 Propiedades edáficas y contenido nutrimental

Dentro de las propiedades físicas predominan la fracción arena, con 79.4% en promedio (Tabla 10), la densidad aparente presenta diferencias significativas entre tratamientos, siendo la zanja bordo la que presenta los valores más adecuados de acuerdo a la NOM-021.

En las propiedades químicas no existen diferencias entre el suelo de la zanja bordo y el testigo para pH, materia orgánica, C orgánico, N total y P extractable. En contraparte, la zanja bordo tuvo valores mayores y fue estadísticamente diferente al sitio testigo en propiedades como la CE, CIC, Ca, Mg y K (Tabla 10). Con respecto a la clasificación dentro de la NOM-021, el pH se clasifica como moderadamente ácido, se presentan efectos despreciables de salinidad, muy baja materia orgánica, la CIC del suelo de la zanja bordo presenta valores altos en relación con el testigo, cuya clasificación es baja, bajo N total y P extractable para el suelo de la zanja bordo y el testigo; el Ca presenta valores medios en la zanja bordo y bajos en el testigo; para el Mg, se presentan valores altos en el suelo de la obra de conservación y medios en el testigo; en cuanto al K, se presentan valores altos para zanja bordo y muy bajos para el testigo.

En el caso de las propiedades biológicas del suelo (Tabla 10), la actividad microbiana expresada en mg de CO₂ kg⁻¹ suelo no fue diferente entre la zanja bordo y el sitio testigo, al igual que en la enzima deshidrogenasa y en las UFC x 10³ g⁻¹ suelo de la biomasa bacteriana.

Tabla 10. Análisis de varianza de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con y sin obra de conservación en San Bartolomé Matlalohcan.

Parámetro	Significancia	Zanja bordo	Testigo	NOM-021
Arena	P = 0.1886	77.71 ± 1.87 a	81.62 ± 2.12 a	Franco arenoso < 1
Arcilla	P = 0.0559	8.38 ± 1.18 a	4.66 ± 1.34 a	
Limo	P = 0.9417	13.91 ± 1.66 a	13.72 ± 1.88 a	
Da (g cm ⁻³)	P = 0.0004	0.91 ± 0.02 b	1.03 ± 0.02 a	
pH	P = 0.6790	5.68 ± 0.18 a	5.79 ± 0.18 a	5.1 - 6.5 Mac*
CE (dS m ⁻¹)	P = 0.0051	0.03 ± 0.0028 a	0.01 ± 0.0028 b	< 1 **
MO (%)	P = 0.4433	1.62 ± 0.24 a	1.14 ± 0.24 a	< 4.0
CO (%)	P = 0.4433	0.94 ± 0.14 a	0.66 ± 0.14 a	< 1.2 Muy bajo**
CIC [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.0086	26.00 ± 1.51 a	11.25 ± 1.85 b	5 – 15 Baja 25 - 40 Alta
N total (%)	P = 0.2629	0.1 ± 0.3 a	0.15 ± 0.3 a	< 0.30 Bajo
P (mg kg ⁻¹)	P = 0.8580	7.41 ± 0.3 a	7.33 ± 0.3 a	< 15 Bajo
Ca [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.0032	8.93 ± 0.6 a	3.6 ± 0.6 b	2 - 5 Baja 5 - 10 Media
Mg [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.0008	3.07 ± 0.13 a	1.33 ± 0.13 b	1.3 - 3.0 Media > 3 Alta
K [Cmol(+) kg ⁻¹]	P = 0.0003	0.67 ± 0.03 a	0.13 ± 0.03 b	< 0.2 Muy baja > 0.6 Alta
CO ₂ (mg kg ⁻¹ suelo)	P = 0.3459	17.66 ± 1.51 a	15.18 ± 1.51 a	-----
Deshidrogenasa (µg TTC g ⁻¹ suelo)	P = 0.6704	0.09 ± 0.05 a	0.03 ± 0.07 a	-----
UFC x 10 ³ (g ⁻¹ suelo)	P = 0.5776	350.00 ± 26.26 a	328.89 ± 26.26 a	-----

Letras iguales por fila indican que no hay diferencias significativas (p ≥ 0.05). Media de Tukey ± E.E.

*NOM-021-SEMARNAT-2000, **Fassbender y Bornemisza (1987).

II.3.2 Familias de especies vegetales predominantes

En cuanto a las principales familias de las especies vegetales presentes en Matlahocan (Tabla 11), en el sotobosque, para la zona con zanja bordo se encontraron siete familias entre las que destacan las Poáceas, Ciperáceas y Juncáceas con porcentajes de 65.2, 18.5 y 7.4 % respectivamente, mientras que en el testigo existen 13 familias, resaltando las Cistáceas, Lamiáceas, Poáceas y Caprifoliáceas con 26.9, 23.8, 20.7 y 12.7 %, respectivamente. En relación a las especies vegetales arbóreas, en la zanja bordo se encontraron siete familias, sobresalen en proporción las Casuarináceas (31%), Pináceas (28.9%) y Cupresáceas (26.7%); en el caso del testigo, se encontraron tres familias en la cual despuntan las Cupresáceas (67.4%), seguida de las Pináceas (30.2%) para finalizar, en una cantidad inferior, la Myrtaceae (2.3%).

Tabla 11. Listado de vegetación por familia, Matlahocan.

Estrato/Familia	Testigo		Zanja bordo	
	No. de Individuos	Porcentaje del total	No de Individuos	Porcentaje del total
Sotobosque				
Alliaceae	8	2.3	0	0.0
Asteraceae	31	8.8	6	4.4
Caprifoliaceae	45	12.7	3	2.2
Cistaceae	95	26.9	0	0.0
Cyperaceae	0	0.0	25	18.5
Fabaceae	7	2.0	0	0.0
Juncaceae	0	0.0	10	7.4
Lamiaceae	84	23.8	0	0.0
Liliaceae	1	0.3	0	0.0
Onagraceae	0	0.0	1	0.7
Orchidaceae	1	0.3	0	0.0
Poaceae	73	20.7	88	65.2
Polemoniaceae	0	0.0	2	1.5
Pteridaceae	7	2.0	0	0.0
Rhamnaceae	1	0.3	0	0.0
Total	353	100	135	100
Arbóreo				
Casuarinaceae	0	0.0	14	31.1
Cupressaceae	29	67.4	12	26.7
Fagaceae	0	0.0	1	2.2
Myrtaceae	1	2.3	3	6.7
Oleaceae	0	0.0	1	2.2
Pinaceae	13	30.2	13	28.9
Rosaceae	0	0.0	1	2.2
Total	43	100	45	100

II.3.3 Índices de diversidad de especies

La riqueza en este sitio de estudio, para el estrato arbóreo de la zanja bordo, presenta 12 especies arbóreas en comparación con el testigo, con cuatro presentes; esto repercute en el índice de equidad de Shannon-Wiener, el cual es mayor en la zanja bordo. Al obtener la prueba estadística T de Hutchinson y compararla con los valores de tablas, se obtienen diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 12). En el sotobosque, la riqueza de especies es similar entre tratamientos (21 en zanja bordo y 23 en testigo), lo que repercute en el índice de Shannon-Wiener; al realizar su prueba estadística, se manifiesta la inexistencia de diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 12).

En el caso del índice de Simpson (Tabla 12), para el estrato arbóreo, en el sitio testigo se presenta una mayor cantidad de especies dominantes contrario a la zanja bordo, donde existe mayor equidad y menor dominancia. Con respecto a la vegetación del sotobosque, la zona de la zanja bordo y el testigo presenta especies poco dominantes al tener ambos tratamientos valores similares y, por lo tanto, mayor equidad entre especies.

Tabla 12. Análisis de los índices de diversidad alfa, Matlalohcan.

Estrato	Sitio	Significancia	N*	S**	Shannon-Wiener	t de Hutchinson	t tablas (p=0.05)	Simpson
Arbóreo	Zanja bordo	$p \leq 0.05$	45	12	1.994	5.865	1.988	0.184
	Testigo		43	4	0.916			0.504
Sotobosque	Zanja bordo	$p \geq 0.05$	132	21	2.245	0.585	1.969	0.16
	Testigo		327	23	2.175			0.179

*Número de especies, **Riqueza de especies.

En el índice de Sørensen (Tabla 13), para el estrato arbóreo existe una similitud de 37.5 % entre la zanja bordo y el sitio testigo; mientras que, en la vegetación del sotobosque, para ambos tratamientos existe una similitud del 27.3 %, lo que indica mayor diferenciación de especies en el sotobosque, respecto a las especies del estrato arbóreo entre la zanja bordo y el testigo.

Tabla 13. Índices de diversidad beta (Sørensen), Matlalohcan.

Grupo 1	Grupo 2	Similitud	
		Arbóreo	Sotobosque
Zanja bordo	Testigo	0.375	0.273

II.3.4 Parámetros de la estructura arbórea

Doce especies arbóreas se encontraron en la zona con zanja bordo (Tabla 14), de las cuales destacan *Casuarina equisetifolia*, *Juniperus deppeana* y *Pinus greggi* con la mayor densidad de individuos por ha, mientras que *Eucalyptus* spp. y *Cupressus benthamii* tienen la mayor cobertura y área basal en m² por ha. Las especies que destacan son *Casuarina equisetifolia* y *Eucalyptus* spp. al presentar el mayor índice de valor de importancia, seguido por *Juniperus deppeana* con valores de entre 38 y 59, mientras que las otras nueve especies poseen valores de importancia de entre 38 y 9.

Para el caso de la zona testigo (Tabla 14), se encontraron cuatro especies arbóreas, destaca *Juniperus deppeana* con una mayor densidad de individuos, cobertura y área basal. En el índice de valor de importancia, esta especie tiene el valor más alto con 177.01, mientras que las otras presentan valores inferiores a 57.

En las clases de altura del sitio testigo (Figura 8), la mayoría de los individuos se distribuyen en un grupo menor a los 5 m, con un total de 29 árboles y solo dos especies, *Juniperus deppeana* en cantidad mayor; para el grupo entre 5 y 10 m, se presentaron 14 individuos y tres especies en las que sobresale *Pinus montezumae*, *Pinus greggi*, y en menor proporción *Eucalyptus* spp.; para la zona

con zanja bordo, en la clase de 0 y 5 m se encontraron la mayor cantidad de individuos (25) de seis especies diferentes, en la que destaca *Juniperus deppeana*, *Pinus greggi* y *Casuarina equisetifolia*, mientras que se presentan ocho especies y 18 individuos en las clases de alturas de entre 5 y 15 m, destacando *Casuarina*, *Juniperus* y *Eucalyptus* spp. Con una altura mayor a los 15 m se presentan dos individuos de las especies de *Eucalyptus* spp. y *Fraxinus* spp.

Tabla 14. Estructura y valor de importancia de las especies arbóreas de sitios con y sin obra de conservación en Matlahocan, Tetla.

Especie/Sitio	Frecuencia (%)	Densidad (Ind ha ⁻¹)	Cobertura (m ² ha ⁻¹)	Cobertura (%)	Área basal (m ² h ⁻¹)	Área basal (%)	IVI
Zanja bordo							
<i>Casuarina equisetifolia</i>	31.11	467	1515.82	15.91	1.95	13.90	59.30
<i>Eucalyptus</i> spp.	6.67	100	3125.37	32.81	5.94	42.23	56.04
<i>Juniperus deppeana</i>	22.22	333	1482.66	15.57	1.32	9.38	38.74
<i>Cupressus benthamii</i>	4.44	67	1826.29	19.17	3.14	22.30	33.89
<i>Pinus greggi</i>	15.56	233	219.13	2.30	0.11	0.79	30.63
<i>Pinus pseudostrobus</i>	6.67	100	473.86	4.97	0.83	5.87	19.68
<i>Pinus cembroides</i>	2.22	33	380.13	3.99	0.35	2.51	11.87
<i>Pinus rudis</i>	2.22	33	143.99	1.51	0.27	1.90	11.26
<i>Fraxinus</i> spp.	2.22	33	240.33	2.52	0.09	0.65	10.01
<i>Pinus lumholtzi</i>	2.22	33	51.05	0.54	0.04	0.28	9.65
<i>Quercus crassifolia</i>	2.22	33	47.65	0.50	0.02	0.11	9.47
<i>Prunus salicifolia</i>	2.22	33	18.85	0.20	0.01	0.09	9.46
Testigo							
<i>Juniperus deppeana</i>	67.44	967	4904.82	66.71	5.776	73.96	177.01
<i>Pinus montezumae</i>	18.60	267	721.52	9.81	1.464	18.74	56.99
<i>Pinus greggi</i>	11.63	167	1639.92	22.30	0.358	4.59	48.22
<i>Eucalyptus</i> spp.	2.33	33	86.39	1.18	0.212	2.72	17.79

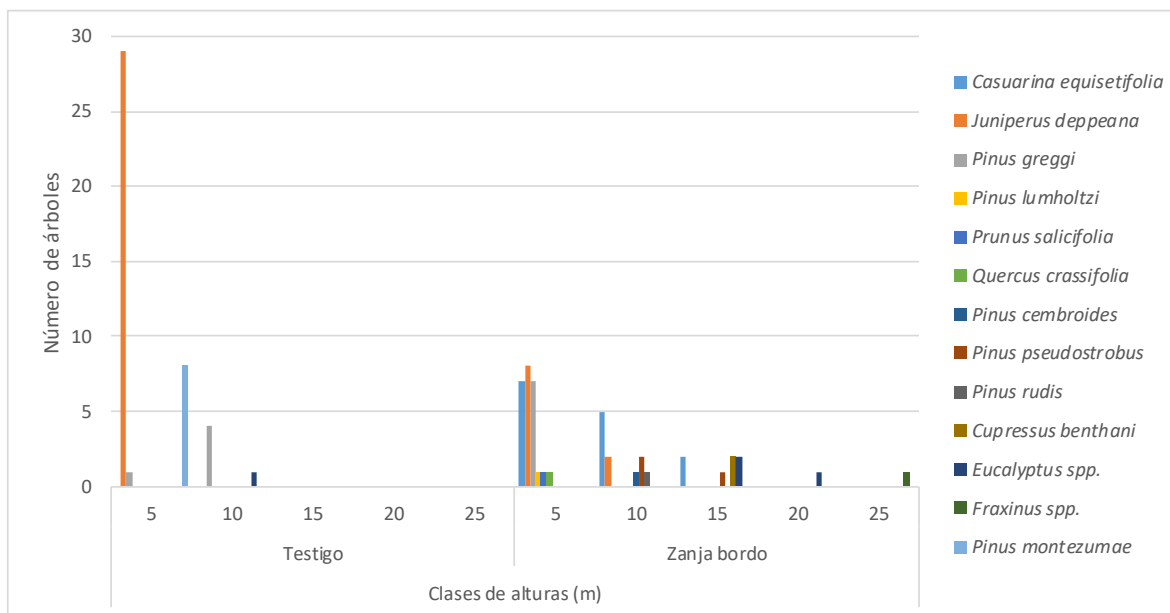


Figura 8. Clases de altura de los árboles del sitio con obra de conservación, Matlalohcan.

En la zona testigo, la cantidad de individuos con diámetros de 0 - 5 cm fueron 13, con la presencia de *Juniperus deppeana*, *Pinus montezumae* y *Pinus greggii*; caso contrario sucede con los diámetros de entre 5 a 10 cm, en donde se presenta la mayor cantidad de individuos respecto a las otras categorías, y *Juniperus deppeana* es el de mayor cantidad de individuos, con 12. Para las clases diamétricas restantes (10 - 15 cm), disminuye tanto el número de especies como el número de individuos presentes, predominan casi exclusivamente el *Juniperus deppeana*. Para la zanja bordo, en los diámetros de 1 a 5 cm se encuentra el mayor número de árboles, en las que destaca *Casuarina equisetifolia* y *Juniperus deppeana*. Entre los diámetros de 5 - 25 cm, se presentan 19 árboles distribuidos entre ocho especies. Para diámetros mayores a los 25 cm, se exhiben dos especies y tres individuos, en el que destaca *Eucalyptus spp.*, y siendo el mayor diámetro de todas las especies muestreadas (Figura 9).

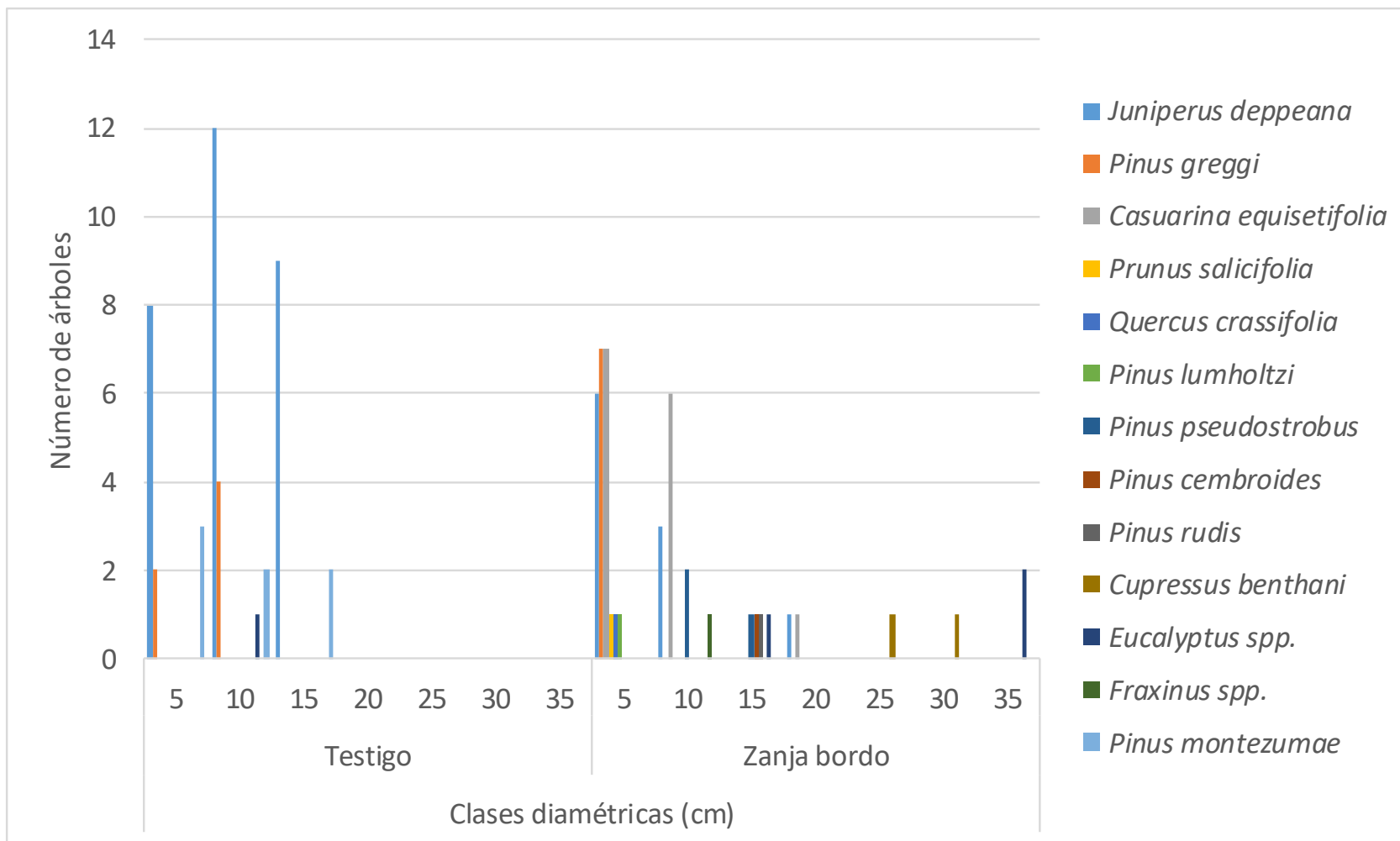


Figura 9. Clases diamétricas de los árboles del sitio con obra de conservación, Matlahochan.

II.4 Relación de las propiedades edáficas y edáficas-vegetación

Dentro de las correlaciones entre las propiedades edáficas (Tabla 15), destaca la correlación negativa y significativa entre la arena y arcilla, mientras que esta última se correlaciona positivamente con el pH; esto indica que, a mayor proporción de arena, menor será el contenido de arcilla, y que, a mayor cantidad de ésta, aumentará el pH. Asimismo, la densidad aparente tiene una correlación inversa con la MO, C orgánico y el CO₂, por lo que una mayor compactación repercutirá en una disminución de estas propiedades, en tanto el K y el Ca tienen una correlación positiva con la MO y C orgánico, pero negativa con la CIC, a su vez que ésta se relaciona positivamente con el Mg.

En cuanto a las relaciones entre las propiedades edáficas y de vegetación significativas (Tabla 16), la biomasa bacteriana se correlaciona negativamente con el índice Simpson herbáceo, y positivamente con el índice Shannon herbáceo y los índices de Sørensen arbóreo y herbáceo, a su vez que estos últimos se correlacionan positivamente con el pH del suelo.

Tabla 15. Correlación de Pearson entre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo.

	Arena	Arcilla	Limo	Da	pH	C.E	MO	CO	N	P	CIC	Mg	K	Ca	CO ₂	UFC x 10 ³	DHS
Arena	1																
Arcilla	-0.8*	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												
C.E	-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	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			
CO ₂	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		
UFC x 10 ³	-0.34	0.00	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 (g cm⁻³), CE: conductividad eléctrica suelo (dS m⁻¹), MO: materia orgánica suelo (%), CO: carbono orgánico suelo (%), N: nitrógeno suelo (%), P: fósforo suelo (mg kg⁻¹), CIC: capacidad de intercambio catiónico suelo [Cmol (+) kg⁻¹], Mg: Magnesio [Cmol (+) kg⁻¹], K: Potasio [Cmol (+) kg⁻¹], Ca: Calcio [Cmol (+) kg⁻¹], CO₂: Dióxido de carbono (mg de CO₂ kg⁻¹ suelo), UFC: Unidades formadoras de colonia, DHS: Deshidrogenasa (µg TPF g⁻¹). *Valores significativos (p≤0.05).

Tabla 16. Correlaciones de Pearson entre las propiedades edáficas y de vegetación.

	Arena	Arcilla	Limo	Da	pH	C.E.	MO	CO	N	P	Mg	K	Ca	CIC	CO ₂	UFC	DHS
H' ar	0.28	-0.36	0.18	-0.48	-0.76	-0.4	-0.21	-0.21	-0.68	0.1	-0.17	0.77	0.72	0.65	0.21	-0.74	-0.49
λ ar	-0.34	0.43	-0.12	0.44	0.83	0.53	0.28	0.28	0.75	0.05	0.31	-0.67	-0.61	-0.53	-0.13	0.82	0.55
Is ar	-0.6	0.68	0.23	0.33	0.96*	0.89	0.36	0.36	0.89	0.55	0.74	-0.21	-0.12	-0.06	0.07	0.99*	0.58
H' ab	-0.57	0.66	0.22	0.26	0.94	0.92	0.41	0.41	0.86	0.61	0.79	-0.13	-0.06	0.02	0.14	0.98*	0.62
λ ab	0.64	-0.72	-0.32	-0.28	-0.95	-0.95*	-0.36	-0.36	-0.89	-0.67	-0.82	0.06	-0.04	-0.09	-0.12	-0.99*	-0.56
Is ab	-0.6	0.68	0.23	0.33	0.96*	0.89	0.36	0.36	0.89	0.55	0.74	-0.21	-0.12	-0.06	0.07	0.99*	0.58
DA	0.48	-0.57	-0.05	-0.45	-0.92	-0.69	-0.28	-0.28	-0.85	-0.24	-0.48	0.52	0.44	0.38	0.1	-0.92	-0.55
CA	0.04	-0.15	0.38	-0.00	-0.67	-0.56	-0.67	-0.67	-0.52	-0.2	-0.49	0.44	0.49	0.25	-0.32	-0.73	-0.86
AB	-0.54	0.46	0.86	0.22	-0.08	0.11	-0.61	-0.61	0.08	0.39	0.11	0.64	0.8	0.5	-0.3	-0.13	-0.71

Da: densidad aparente (g cm^{-3}), CE: conductividad eléctrica suelo (dS m^{-1}), MO: materia orgánica suelo (%), CO: carbono orgánico suelo (%), N: nitrógeno total suelo (%), P: fósforo suelo (mg kg^{-1}), CIC: capacidad de intercambio catiónico suelo [Cmol (+) kg^{-1}], Mg: Magnesio [Cmol (+) kg^{-1}], K: Potasio [Cmol (+) kg^{-1}], Ca: Calcio [Cmol (+) kg^{-1}], CO₂: Dióxido de carbono ($\text{mg de CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ suelo), UFC: Unidades formadoras de colonia $\times 10^3$, DHS: Deshidrogenasa ($\mu\text{g TPF g}^{-1}$), H': índice de Shannon, λ: índice de Simpson, Is: índice de similitud de Sørensen, ar: arbóreo, ab: arbustivo, DA: Densidad arbórea (Ind ha^{-1}), CA: Cobertura arbórea ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$), AB: Área basal ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$). *Valores significativos ($p \leq 0.05$).

II.5 Agrupación de las propiedades edáficas

En cuanto al análisis de componentes principales de las propiedades edáficas, se muestra que la proporción de la variabilidad total explicada por los componentes CP1 y CP2 es de 52 y 22% (Tabla 17), lo que indica que estos dos componentes explican el 74% de la variación total de los datos. El análisis también mostró que, en el CP1, la capacidad de intercambio catiónico tiene el valor positivo más alto, seguido del Ca, materia orgánica y C orgánico (Tabla 18). Esto puede indicar que la CIC estará en función de cationes intercambiables de calcio, y el contenido de materia orgánica y el C orgánico del suelo. Otra variable que influye en la similitud de los sitios es la arena (CP2).

Tabla 17. Análisis de componentes principales: Autovalores de las propiedades edáficas.

Lambda	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	8.85	0.52	0.52
2	3.81	0.22	0.74
3	2.53	0.15	0.89
4	0.97	0.06	0.95
5	0.73	0.04	0.99
6	0.12	0.01	1

Tabla 18. Análisis de componentes principales: Autovectores de las propiedades edáficas.

Indicador	Autovectores	
	e1	e2
Arena	-0.00012	0.47
Arcilla	-0.18	-0.41
Limo	0.29	-0.16
Da	-0.3	-0.18
pH	-0.13	-0.41
C.E.	0.3	-0.2
MO	0.31	0.04
CO	0.32	0.03
N total	0.02	-0.41
P	0.23	-0.23
Mg	-0.26	-0.11
K	-0.25	0.05
Ca	0.32	-0.03
CIC	0.32	-0.04
CO ₂	0.21	0.15
UFC x 10 ³	0.22	-0.29
Enzima deshidrogenasa	0.04	0.01

Da: densidad aparente (g cm⁻³), CE: conductividad eléctrica suelo (dS m⁻¹), MO: materia orgánica suelo (%), CO: carbono orgánico suelo (%), N: nitrógeno suelo (%), P: fósforo suelo (mg kg⁻¹), CIC: capacidad de intercambio catiónico suelo [Cmol (+) kg⁻¹], Mg: Magnesio [Cmol (+) kg⁻¹], K: Potasio [Cmol (+) kg⁻¹], Ca: Calcio [Cmol (+) kg⁻¹], CO₂: mg de CO₂ kg⁻¹ suelo, UFC: Unidades formadoras de colonia, Deshidrogenasa (µg TPF g⁻¹).

La gráfica Biplot (Figura 10) en todos los tratamientos de Gustavo Díaz Ordaz, muestra que hubo mayor incidencia de materia orgánica y C orgánico, lo cual repercute en la respiración microbiana expresada como CO₂, y en menor medida con la biomasa bacteriana, propiedades con mayores valores respecto a los otros sitios, en tanto que la incidencia de los cationes Ca y K está dada por su abundancia media (Tabla 4), y la alta correlación existente entre ambas (Tabla 15). En el caso de Matlahocan y Zacapexco las variables que más inciden son el Mg, la CIC y la Da, cuyos valores presentan diferencias estadísticas entre tratamientos por sitio, sus correlaciones entre sí son significativas, y los testigos de ambos sitios presentan un mayor grado de compactación en el suelo.

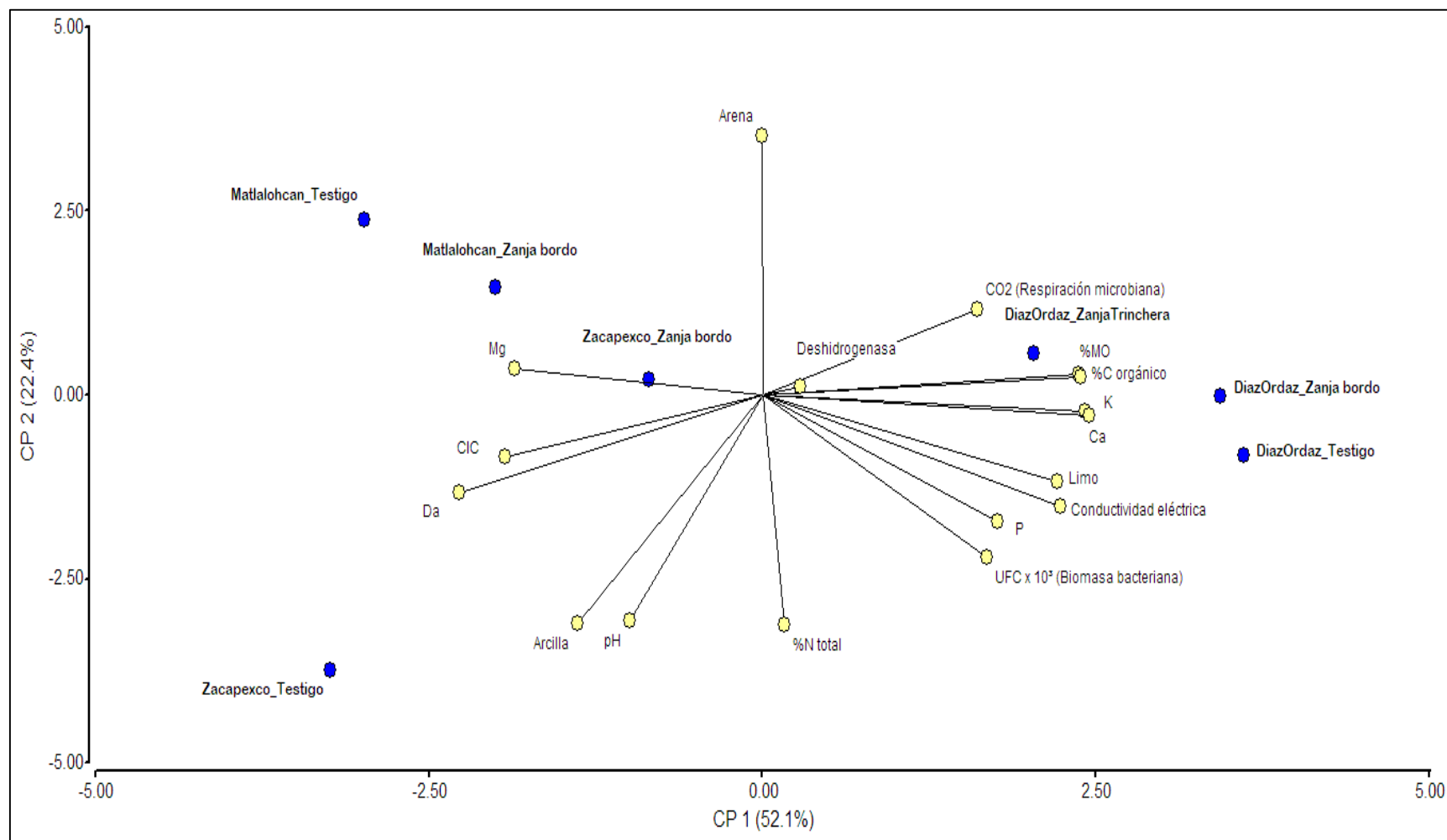


Figura 10. Gráfico Biplot de las propiedades edáficas.

Respecto al análisis de componentes principales de las propiedades edáficas y de vegetación (Tabla 19) de los sitios Zacapexco y Matlalohtcan, la proporción de la variabilidad total explicada por los componentes CP1 y CP2 es del 50 y 26%, explicando ambos un 76% de la variabilidad de los datos. Este análisis indica que la biomasa bacteriana y el índice Shannon arbustivo son las variables que presentan los valores positivos más altos, e inmediatamente se sitúa el pH, N total, y el índice Simpson arbóreo, lo cual indica que las condiciones de acidez o alcalinidad de los sitios, la dominancia de especies arbóreas y la cantidad de nitrógeno en el suelo, serán preponderantes para definir la cantidad de biomasa bacteriana del suelo y la equidad de especies arbustivas presentes en los sitios. Por otro lado, el indicador que presenta el valor negativo más alto es el índice Simpson arbustivo, y continúa con la densidad arbórea, la cobertura arbórea y el índice Shannon arbóreo (Tabla 20); esto puede significar que la equidad de especies arbóreas, su cobertura y densidad de individuos definirán la dominancia de especies arbustivas de ambos sitios.

Tabla 19. Análisis de componentes principales: Autovalores de las propiedades edáficas y parámetros de vegetación.

Lambda	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	12.9	0.5	0.5
2	6.75	0.26	0.76
3	6.35	0.24	1

Tabla 20. Análisis de componentes principales: Autovectores de las propiedades edáficas y parámetros de vegetación.

Indicador	Autovectores	
	e1	e2
Arena	-0.17	0.29
Arcilla	0.19	-0.26
Limo	0.07	-0.32
Da	0.1	-0.32
pH	0.27	-0.09
C.E.	0.25	-0.0037
MO	0.09	0.36
CO	0.09	0.36
N total	0.25	-0.16
P	0.15	0.02
Mg	0.2	0.09
K	-0.06	0.03
Ca	-0.04	-0.07
CIC	-0.02	0.09
CO ²	0.01	0.34
UFC x 10 ³	0.28	-0.04
Deshidrogenasa	0.15	0.32
Shannon arbóreo	-0.22	-0.03
Simpson arbóreo	0.24	0.04
Sørensen arbóreo	0.28	0.01
Shannon arbustivo	0.28	0.03
Simpson arbustivo	-0.27	-0.0031
Sørensen arbustivo	0.28	0.01
Densidad arbórea	-0.26	-0.01
Cobertura arbórea	-0.22	-0.2
Área basal	-0.07	-0.27

Da: densidad aparente (g cm⁻³), CE: conductividad eléctrica suelo (dS m⁻¹), MO: materia orgánica suelo (%), CO: carbono orgánico suelo (%), N: nitrógeno suelo (%), P: fósforo suelo (mg kg⁻¹), CIC: capacidad de intercambio catiónico suelo [Cmol (+) kg⁻¹], Mg: Magnesio [Cmol (+) kg⁻¹], K: Potasio [Cmol (+) kg⁻¹], Ca: Calcio [Cmol (+) kg⁻¹], CO₂: mg de CO₂ kg⁻¹ suelo, UFC: Unidades formadoras de colonia, Deshidrogenasa (µg TPF g⁻¹), Densidad arbórea (Ind ha⁻¹), Cobertura arbórea (m² ha⁻¹), Área basal (m² ha⁻¹).

De acuerdo al gráfico Biplot (Figura 11), para la zanja bordo y el sitio testigo de Matlalohcan tienen mayor incidencia los índices Simpson arbustivo y Shannon arbóreo, el cual presenta diferencias significativas entre tratamientos, así como la densidad y cobertura arbórea, cuyos valores son más altos en comparación con el otro sitio. En el caso de Zacapexco, en la zanja bordo incide la actividad de la enzima deshidrogenasa, así como la materia orgánica y el C orgánico, de los que sus porcentajes también son más altos. Referente al testigo, destaca el N total, cuyo porcentaje en Zacapexco es mayor comparado a Matlalohcan; el pH, al ser el testigo más alcalino y estadísticamente diferente a la zanja bordo, así como la densidad aparente, cuyo valor indica que tiene el mayor grado de compactación el suelo del sitio.

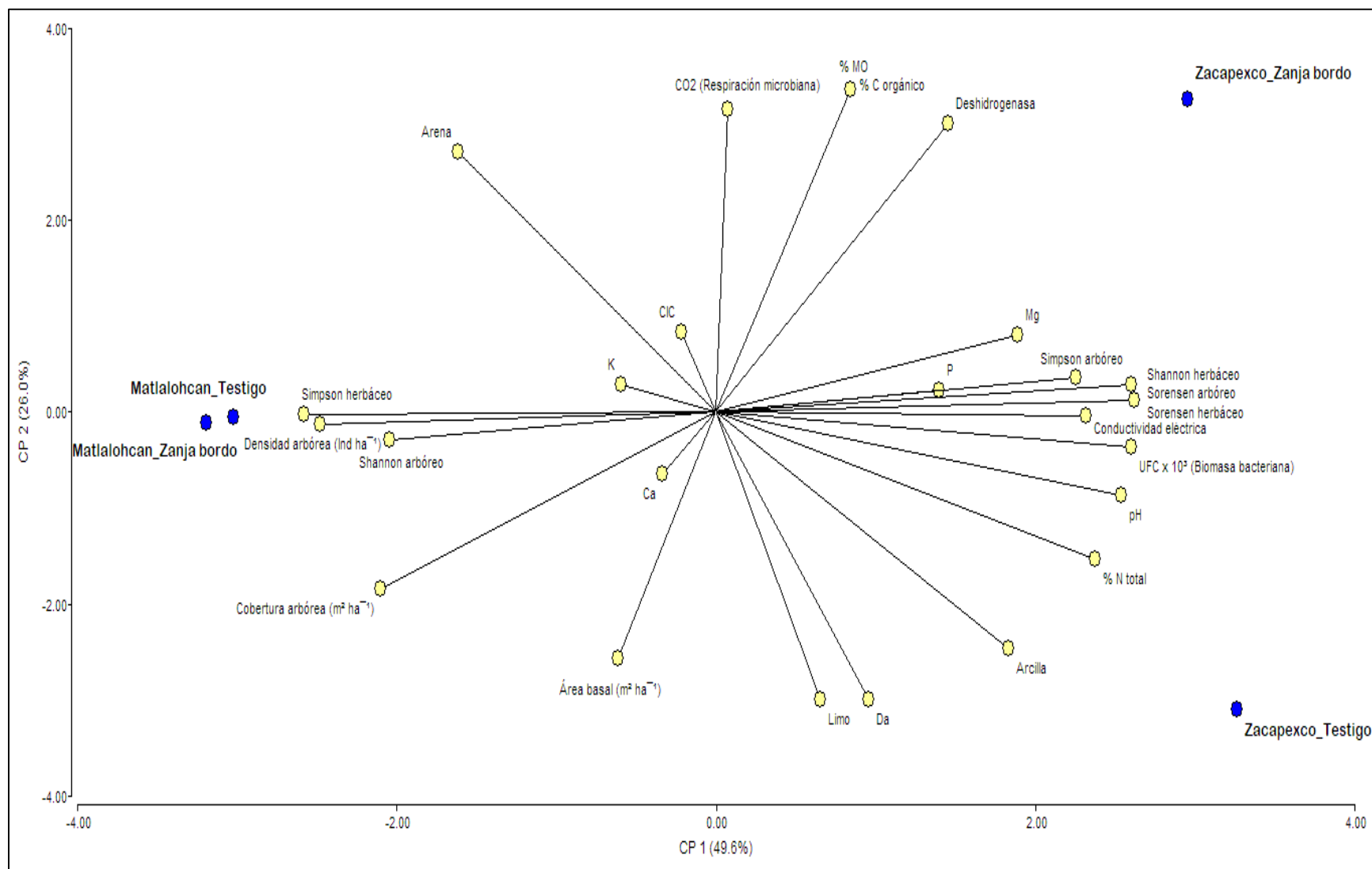


Figura 11. Gráfico Biplot de las propiedades edáficas y parámetros de vegetación.

III DISCUSIÓN

III.1 Propiedades edáficas y contenido nutrimental

Los suelos presentan una predominancia de la fracción arena en los tres sitios de estudio para los tratamientos con y sin obra de conservación (Tabla 4, 5 y 10), lo cual está relacionado con el intemperismo de la fase mineral y la naturaleza de los tepetates, compuesto principalmente por cuarzos, feldespatos, piroxenas y vidrios volcánicos que generan una fracción gruesa (Gutiérrez-Castorena, 1989) y una textura areno-arcillo-limosa (Hidalgo *et al.*, 1999), cuya proporción puede tomarse como un indicador de la perturbación antropogénica al afectar el contenido de la materia orgánica del C y N del suelo (Matus *et al.*, 2011).

La densidad aparente (Da) en los sitios fue similar en las áreas con presencia de obras de conservación, las cuales tienen un grado de compactación menor en comparación con las áreas testigo; en ambos casos, estos valores son menores a lo reportado por Prat *et al.* (2003) y Navarro-Garza *et al.* (2004), lo cual se debe a la presencia de materiales amorfos como la arena (Tapia *et al.*, 1999) cuyas partículas son importantes, debido a que una disminución en su tamaño incrementa la Da, por lo que ambas propiedades guardan una relación inversa entre sí (Vargas-Tapia *et al.*, 2008; Mendoza *et al.*, 2018). En consecuencia, al tener en los tres sitios de estudio un predominio de la fracción arena, la densidad aparente se incrementará. La presencia de un alto porcentaje de arena es un problema debido a que ésta tiene mayor capacidad de infiltración y menor capacidad de retención y almacenamiento de agua y, por lo tanto, influye negativamente en otras propiedades edáficas y en la vegetación (Mendoza *et al.*, 2018).

En Gustavo Díaz Ordaz, cuya zona corresponde a un bosque de pino-encino en proceso de degradación por deforestación, el pH es moderadamente ácido (6.02), lo cual es similar a lo reportado por Vázquez-Cuecuecha *et al.* (2015) para una zona boscosa con otro tipo de vegetación. En Matlalohcan las condiciones actuales son moderadamente ácidas (5.7), lo que contrasta con lo reportado por

Quantin *et al.* (1993), quienes en la década de los 90's para el mismo sitio de estudio tuvieron valores moderadamente alcalinos. Al respecto, Etchevers *et al.* (1992a) indican que los tepetates poseen un pH que va de neutros a alcalinos. En el caso de Gustavo Díaz Ordaz y Matlalohcan las condiciones actuales reflejan una moderada acidificación producto de la incorporación de materia orgánica, la cual tiene un efecto acidificante en el suelo, así como por las especies vegetales que extraen cationes básicos (Mg, Ca y K) y liberan a través de la raíz a la solución del suelo, iones hidrógeno, lo que coadyuva a aumentar la acidez (Morales *et al.*, 2012). Lo anterior, sumado a la destrucción de la capa superficial de suelo en contacto con el tepetate y su eventual debasificación por la pérdida y lavado de sales solubles, siendo un mecanismo muy frecuente, producto de la erosión (Gama-Castro *et al.*, 2007); sin embargo, Campillo y Sadzawka (2006) mencionan que estos valores de pH no son una limitante para la disponibilidad de nutrimentos y el desarrollo de especies vegetales.

En el caso de Zacapexco, se presentaron valores moderadamente alcalinos, siendo mayor el pH del área testigo (8.2), respecto a la obra de conservación (7.5). Estos valores coinciden con lo reportado por Munive-Martínez *et al.* (2018) en un sitio cercano con valores similares, y puede explicarse por la ubicación de ambos sitios en zonas que reciben escurrimientos superficiales de zonas altas con afectaciones por erosión hídrica, en donde se transportan sedimentos y se depositan, acumulándose sales solubles (bases) producto del drenaje natural, lo que ocasiona una alta relación sílice/sesquióxidos (Gama-Castro *et al.*, 2007; Escamilla-Sarabia *et al.*, 2002). Lo anterior provoca un contenido mayor de CaCO_3 que contribuye a crear condiciones moderadamente alcalinas (Etchevers *et al.*, 1992b). Para el área con obra de conservación, el pH es menor y está relacionado con la materia orgánica y la precipitación como fuentes de acidificación del suelo (Ortiz-Solorio, 2019), la zanja bordo puede contribuir mediante la acumulación de humedad (CONAFOR, 2007). Campillo y Sadzawka (2006) mencionan que estos valores moderadamente alcalinos producen una disminución de la disponibilidad de P y deficiencia de algunos micronutrimentos,

que si bien no afecta directamente a las plantas, si pueden tener un efecto indirecto drástico.

En cuanto a la conductividad eléctrica, los sitios presentan valores inferiores a lo reportado por Munive-Martínez *et al.* (2018), similar a lo indicado por Navarro-Garza *et al.* (2004) para tepetates en Tlaxcala; los resultados obtenidos indican que existen cantidades despreciables de salinidad de acuerdo a la NOM-021 (DOF, 2002), por lo que no existirán limitantes para el desarrollo de especies vegetales, pérdida de estructura del suelo y afectaciones a otras propiedades (López, 2005).

La materia orgánica en Gustavo Díaz Ordaz los valores fueron bajos para todos los tratamientos, en comparación a lo reportado por lo reportado por Vázquez-Cuecuecha *et al.* (2015) quienes obtuvieron porcentajes de 23% en una zona forestal conservada, donde las condiciones de manejo propician valores mayores al presente trabajo, además que las condiciones ecológicas y de vegetación (bosque de *Pinus patula*) donde la precipitación es mayor ha conllevado a suelos más profundos en comparación con el sitio muestreado. En Zacapexco, la materia orgánica fue mayor en la zanja bordo respecto al testigo (Tabla 5), en tanto que en Matlalohcan no se presentan diferencias entre tratamientos (Tabla 10), clasificándose sus valores como muy bajos en ambos sitios (DOF, 2002). Al respecto, Munive-Martínez *et al.* (2018) y Solís *et al.* (2000) presentaron porcentajes de 0.12 y 0.3% de materia orgánica, respectivamente, en zonas degradadas donde el tepetate se encuentra expuesto, valores inferiores a lo obtenido en Zacapexco y Matlalohcan, aunque clasificándose aún muy baja de acuerdo a la NOM-021 (DOF, 2002); esto indica que, aunque los sitios de estudio de este trabajo exhiben mejores porcentajes de materia orgánica respecto a zonas con tepetate expuesto, las mejorías en cuanto a tratamientos sólo se presentan en el sitio Zacapexco. Vázquez-Alvarado *et al.* (2011) mencionan que el mismo desarrollo de las obras de conservación de suelos en conjunto con la reforestación y su elección de especies son importantes para obtener resultados exitosos, lo que puede conducir a un aumento de la materia orgánica y devenir en la retención

de agua y suelo, lo que disminuye la compactación y estabiliza la estructura del suelo (Murillo *et al.*, 2014), lo cual puede apreciarse en los valores de densidad aparente obtenida en el suelo de la zanja bordo de Zacapexco y Matlahchán (Tabla 5 y 10). No obstante, su cantidad estará sujeta a diversos factores como la incorporación de restos orgánicos, la velocidad de oxidación química y biológica, condiciones abióticas, el tiempo, las prácticas de manejo (Julca-Otiniano *et al.*, 2006) y que el tipo de vegetación empleada para su repoblamiento sea preferentemente afín al tepetate de manera natural (Callo, 2013). La revegetación es la única manera de incrementar la materia orgánica del suelo (De León y Etchevers, 1999) para promover la actividad biológica del tepetate y mejorar su fertilidad (Báez-Pérez, 2010).

En cuanto al C orgánico de los tres sitios (Tabla 5 y 10) en comparación con lo reportado por Vázquez-Cuecuecha *et al.* (2015) los valores de este estudio son menores (14% de C orgánico), mientras que Etchevers *et al.* (1992b) obtienen valores muy bajos de C orgánico (0.15%) en tepetates representativos de Tlaxcala. Por otro lado, García *et al.* (2017) indican que lo usual en C orgánico para bosques de encino-pino es 1.86%, lo cual es inferior a lo obtenido en Gustavo Díaz Ordaz (5.10%), donde la vegetación original es parecida; estos autores también reportan que los bosques de táscate tienen en promedio 1.35% de C orgánico, cantidad que es mayor a lo obtenido en Matlahchán (0.8 %) y el testigo de Zacapexco (0.93%), pero inferior a la zanja bordo de este sitio (2.28%).

Los bajos valores de C orgánico pueden deberse a diversos factores: a) el porcentaje de arena dificulta retener el C orgánico (Báez *et al.*, 2011), b) el origen volcánico del tepetate presenta problemas de orden químico y le otorga baja fertilidad (Hidalgo *et al.*, 1999) y c) el cambio de uso de suelo, ya que genera la pérdida de la vegetación original y cambia la estructura y composición del suelo, viéndose reflejada en la manifestación de vegetación secundaria (Molina *et al.*, 2014). Las variaciones en el C orgánico también son causadas por las condiciones ecológicas, topográficas y las prácticas de manejo (Vergara-Sánchez *et al.*, 2004). Estos cambios en el C orgánico producen afectaciones en las propiedades físicas,

químicas y biológicas que determinan la productividad del suelo (Martínez *et al.*, 2008).

Concerniente al N total en Matlahochan (Tabla 10), los valores son ligeramente inferiores a los 0.17% reportados por Soto-Mora *et al.* (2016) en suelos cercanos a la zona. Munive-Martínez *et al.* (2018) y Solís *et al.* (2000) obtuvieron valores de 0.02 y 0.12 %, respectivamente, de N total en sitios con afloración de tepetate, lo cual es inferior a lo obtenido en Zacapexco (Tabla 5) y cercano a lo encontrado en Gustavo Díaz Ordaz (Tabla 4) para el suelo de la zanja bordo y trinchera, aunque inferior a lo obtenido en el testigo de este sitio; siendo el único tratamiento/sitio que, de acuerdo a la NOM-021, presenta una clasificación de N total media, en tanto que los demás sitios y sus respectivos tratamientos presentan una clasificación baja. Al ser sitios degradados, ya que la capa superficial está constituida principalmente de tepetate, el cual es una limitante para el desarrollo de especies vegetales al encontrarse el nitrógeno en niveles inferiores a la demanda necesaria (Etchevers *et al.*, 1992b), y sumado a la baja aportación de material orgánico, genera un bajo equilibrio entre la tasa de mineralización y la de incorporación de materia orgánica y nitrógeno, ocasionando un déficit en cuanto a la concentración de la materia orgánica (Matus y Maire, 2000). Esto puede explicar el resultado en Gustavo Díaz Ordaz, ya que parte del balance del nitrógeno está relacionado con las pérdidas, las cuales están relacionadas con la extracción de nitrógeno por la vegetación, y las ganancias, representadas por la fijación biológica, tanto de forma libre como simbiótica (Rodríguez *et al.*, 1985); la cantidad de biomasa bacteriana estaría relacionada con estas ganancias, existiendo una correlación entre estos microorganismos, generalmente asociados a plantas superiores y a la fijación de nitrógeno (Rodríguez *et al.*, 1985; Rincón y Gutiérrez, 2012), lo que se manifestaría en el testigo de Díaz Ordaz.

Para el P disponible, Zacapexco y Gustavo Díaz Ordaz (en sus dos tratamientos) presentan mayor cantidad de este nutrimento (Tabla 4 y 5) en comparación a lo reportado por Munive-Martínez *et al.* (2018), quienes reportan en promedio 3.5 mg kg⁻¹ en un sitio aledaño; en Matlahochan, los valores son similares (Tabla 10) a los

7.25 mg kg⁻¹ encontrados por García-Gallegos *et al.* (2014) en suelos cercanos a la zona de estudio. Etchevers *et al.* (1992c) mencionan que la concentración promedio de P en tepetates sin cultivar es de 2.4 a 3 mg kg⁻¹, por lo que las cantidades de este elemento son ligeramente mayores en los tres sitios de estudio, aunque de acuerdo a la NOM-021 la cantidad es baja. Esto se atribuye al bajo nivel de P presente en el material parental (Etchevers *et al.*, 1992b), por lo que el aumento, disponibilidad y dinámica de este elemento no estará sujeta a la meteorización de minerales primarios, sino a cambios en el uso de suelo, mineralización, inmovilización y solubilización por la actividad microbiana (principalmente por los hongos endomicorrízicos), absorción por las plantas y su retorno por residuos vegetales (Rincón y Gutiérrez, 2012). El tipo de especies forestales presentes y su consecuente producción de hojarasca y materia orgánica tendrán un papel importante sobre las concentraciones de P (Morán *et al.*, 2012).

En cuanto a la presencia de cationes intercambiables como Ca, Mg y K, de acuerdo a la NOM-021, en Gustavo Díaz Ordaz, Zacapexco y la zanja bordo de Matlalohcan se presentaron valores medios (Tabla 4, 5 y 10) mientras que en el testigo de este sitio los valores fueron bajos. Al respecto, Etchevers *et al.* (1992b) refieren que para tepetates con contenidos de CaCO₃ se presentan normalmente valores de 7.7 de Ca, similar a lo encontrado en todos los sitios de estudio, y para Mg y K, 6.2 y 1.2 Cmol (+) kg⁻¹, respectivamente, los cuales son valores superiores a lo encontrado en este estudio, no así para Matlalohcan, en donde se tuvieron menores valores. Hidalgo *et al.* (1999) indican que los tepetates son ricos en bases intercambiables debido a que poseen una fracción mineral abundante en vidrios volcánicos y plagioclasas, lo cual explicaría la presencia de valores medios a muy altos en Gustavo Díaz Ordaz, Zacapexco y la zanja bordo de Matlalohcan, sin embargo, el testigo tuvo valores bajos de estas bases intercambiables y puede deberse a varios factores, como la pérdida de éstos nutrimentos por procesos erosivos derivados de la actividad antrópica y el intemperismo (Gáspari *et al.*, 2006; Escamilla-Sarabia *et al.*, 2002) y su consecuente cambio de vegetación que puede llegar a disminuir los cationes disponibles (Pedraza y Dezzio, 2011). El tipo

de vegetación presente y sus características biológicas son un factor importante en la mejora de los agregados del suelo (Velázquez-Rodríguez *et al.*, 2001).

Respecto a la CIC, con base a la NOM-021 su clasificación es alta en Zacapexco y muy alta en Gustavo Díaz Ordaz (Tabla 4 y 5), lo que contrasta con lo obtenido por Munive-Martínez *et al.* (2018) quienes reportan valores de 10 Cmol (+) kg⁻¹ en un sitio aledaño; para Matlahochan en la zanja bordo fue mayor, en tanto que en el testigo menor (Tabla 10) y cuyos valores son más cercanos a lo obtenido por Soto-Mora *et al.* (2016) y García-Gallegos *et al.* (2014) quienes reportan entre 9 y 16 Cmol (+) kg⁻¹, respectivamente en lugares cercanos. Los valores muy altos de la CIC en Díaz Ordaz y altos en Zacapexco y en la zanja bordo de Matlahochan, que se deben a la naturaleza de los tepetates, los cuales contienen una CIC elevada (entre 17 y 40 Cmol (+) kg⁻¹) originada por la alta presencia de bases como Ca, Mg y K, las cuales son liberadas por el intemperismo de los minerales que lo conforman y la abundancia de arcillas 2:1 (Etchevers *et al.*, 1992a; Hidalgo *et al.*, 1999; García-Cruz *et al.*, 2008; Rodríguez-Tapia *et al.*, 2004). Di Gerónimo *et al.* (2018) indican que la presencia de especies arbóreas con varios años de establecimiento (como las presentes en la zanja bordo) mejoran la CIC en comparación con aquellos suelos con vegetación natural herbácea predominante, debido a que, de acuerdo a Velázquez-Rodríguez *et al.* (2001) los árboles inciden en la desintegración de fragmentos del tepetate, reorganizando los agregados a lo largo de los años y mejorando las características estructurales del tepetate al paso del tiempo.

En las propiedades biológicas, y en referencia a la respiración microbiana, los valores de Gustavo Díaz Ordaz y la zanja bordo de Zacapexco (Tabla 4 y 5) son similares a lo reportado por Solís *et al.* (2000) quienes indican que la respiración microbiana en tepetates expuestos es de 6 y 29.9 mg de CO₂ con presencia de vegetación, lo cual, en este último caso, está alejado de lo obtenido en Matlahochan y el testigo de Zacapexco. La producción de CO₂ estará influida por la actividad metabólica de las raíces de las plantas, micorrizas, comunidades microbianas y el tipo de vegetación asociada (Moreno *et al.*, 2015; Yáñez-Díaz *et*

al., 2017), por lo que la presencia de vegetación en todos los sitios y sus tratamientos contribuyó a que la respiración microbiana no sea baja como en el tepetate expuesto, que menciona Solís *et al.* (2000); la cantidad de materia orgánica y C orgánico presentes en el suelo es fundamental para los microorganismos (Ortiz-Solorio, 2019) como se observa en los tratamientos de Zacapexco y Gustavo Díaz Ordaz, contrario a Matlahocan, cuyos valores de materia orgánica son bajos, y por lo tanto, se ve disminuida la respiración microbiana. El metabolismo de los microorganismos también será sensible a condiciones de acidez o alcalinidad excesiva (Coyne y Rasskin, 2000), lo cual puede explicar que el testigo de Zacapexco presente condiciones menos idóneas para la respiración al tener un pH más alcalino. De igual manera, el incremento de la densidad aparente por la compactación del suelo será significativa en la reducción de las tasas de respiración por la disminución del flujo de oxígeno, agua, y la abundancia de microorganismos en el suelo (Barajas-Guzmán *et al.*, 2020), lo cual se observa con la alta densidad aparente y baja producción de CO₂ del testigo de Matlahocan y Zacapexco.

En la biomasa bacteriana, Gustavo Díaz Ordaz y Zacapexco (Tabla 5 y 6) se obtuvieron valores similares a lo reportado por Solís *et al.* (2000) para tepetates con residuos vegetales, los cuales llegan a presentar entre 875 y 954 UFC x 10³, y hasta 812 UFC x 10³ en tepetates sin vegetación, pero fue superior a lo obtenido en Matlahocan (Tabla 10). Esto posiblemente está dado por la compactación del suelo y menor presencia de carbono/materia orgánica como fuente de alimento (Bhattarai *et al.*, 2015), la cual es más baja en Matlahocan, respecto a Zacapexco y Gustavo Díaz Ordaz. Actúan también otros factores como la humedad del suelo (Paradelo y Barral, 2009), la vegetación y el tipo de raíces y su asociación con microorganismos, principalmente bacterias que estimularán exudados que influirán en los agregados del suelo (Tang *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2013); en este sentido, al tener Matlahocan vegetación exótica de rápido crecimiento como el Eucalipto, se produce un impacto negativo sobre la biomasa bacteriana debido principalmente a sus exudados (Hernández-Hernández *et al.*, 2008) sumado a que dichas especies reducen la humedad (Louro *et al.*, 2008) lo cual es una limitante

para el aumento de la población de bacterias y demás microorganismos (Singh *et al.*, 2013). Estas condiciones no se presentan en Zacapexco y Gustavo Díaz Ordaz, sin embargo, en este último sitio, el testigo presenta mayores UFC respecto a la zanja bordo y zanja trinchera, lo cual puede explicarse a la fijación biológica del nitrógeno atmosférico a través de bacterias (García, 2011) en la que los exudados de las raíces herbáceas son responsables de un efecto rizosférico que fomenta la población microbiana (Pajares *et al.*, 2006), producto de una ventaja adaptativa que proporcionan ciertos consorcios bacterianos bajo condiciones de fuerte degradación y cuando el nitrógeno disponible es deficiente (Hernández-Flores *et al.*, 2013; Pineda y Lizarazo-Forero, 2013); esto también puede corroborarse al observar la cantidad de N total obtenido en el testigo, respecto a la zanja bordo y zanja trinchera.

Respecto a la enzima deshidrogenasa, los valores presentados en los tratamientos de los tres sitios de estudio (Tabla 4, 5 y 10) son menores a lo reportado por Pajares-Moreno *et al.* (2010 a y b), que indican una actividad de la enzima deshidrogenasa de 21.2 y 32.2 $\mu\text{g TPF g}^{-1}$ en tepetate sin vegetación y tepetate con algún tipo de vegetación, y en bosque de pino reforestado y bosque de pino encino, una actividad de 240 y 489 $\mu\text{g TPF g}^{-1}$. Nannipieri *et al.* (1990) y Mambu (2014) indican que la actividad de la enzima deshidrogenasa es muy variable dependiendo del tipo de suelo, la época del año, el clima, los nutrientes presentes en el suelo, las condiciones experimentales y el tipo de vegetación. Sinha *et al.* (2009) como se citó en Kumar *et al.* (2013), reportan que en sitios con presencia de Eucalipto presentan una actividad de la enzima deshidrogenasa muy baja, lo cual se puede observar en Matlalohcan. Por otra parte, la estabilidad de las enzimas dependerá en parte del pH del suelo, cuyo intervalo se ubica entre 7.4 y 8.5 (Trevors, 1984), lo que puede explicar las diferencias encontradas en el suelo de la zanja bordo de Zacapexco, en donde el pH fue alcalino, respecto a los pH ácidos de Matlalohcan y Gustavo Díaz Ordaz.

Si bien se ha mencionado que los resultados de la deshidrogenasa por el método de TTC pueden estar influidos negativamente por su toxicidad hacia los

microorganismos y la sensibilidad al oxígeno, dado que la reducción del TTC está condicionada a las condiciones anaerobias con que se encuentre la muestra durante el experimento (Benefield *et al.*, 1977; Von Mersi y Schinner, 1991; Friedel *et al.*, 1994), estas limitantes no pueden vincularse totalmente a la sensibilidad del método; sin embargo, Gong (1997) indica que es preciso tomar en cuenta las concentraciones idóneas de TTC necesarias para su reducción, obtenidas de la estimación de las condiciones óptimas y máximas de la deshidrogenasa para el tipo particular de suelo o similar, y del cual no hay estudios sobre tepetates, lo cual explicaría las divergencias entre los resultados de este estudio. No obstante, aunque el método usado (al igual que otros que utilizan sales solubles de tetrazolium como reductor químico) puede usarse como una determinación cualitativa más que cuantitativa debido a lo poco sensibles que son como aceptores de electrones y su consecuente baja estimación real de la actividad deshidrogenasa (Mambu, 2014; Benefield *et al.*, 1977; Gong, 1997) sí pueden considerarse válidas si se usan para fines comparativos como indicador de la degradación del suelo y el impacto de las prácticas de manejo (García y Gil, 2003; Kumar *et al.*, 2013).

III.2 Principales familias y especies

III.2.1 Estrato arbustivo y herbáceo

En Zacapexco la vegetación es pastizal inducido, originalmente bosque de táscate y el suelo con baja fertilidad (Tabla 10), el estrato arbustivo presenta en mayor porcentaje de individuos de la familia Poaceae (63.1% testigo; 48.4% zanja bordo), y destacan especies como *Pennisetum clandestinum*, una invasora de fácil establecimiento y propagación que limita los procesos de restauración ecológica al cambiar la naturaleza de los ecosistemas, desplazar la vegetación nativa (Camacho-Ballesteros, 2018; March y Martínez, 2007) y disminuir la calidad del suelo en sitios con su presencia (Noguera y Vélez, 2011); *Aegopogon cenchroides* e *Hilaria cenchroides*, indicadoras de disturbio, afinidad sucesional pionera y

establecida principalmente en pastizales (Ramírez *et al.*, 1998; Gómez-Sánchez *et al.*, 2011); y *Muhlenbergia firma* en la zanja bordo, cuyo género se caracteriza por manifestarse durante un estado sucesional temprano y hallarse tanto en pastizales (Ramírez *et al.*, 1998) como en bosques de táscate (Herrera y Peterson, 2007). Esta presencia de Poáceas, especialmente con mayor proporción en el testigo, puede relacionarse por su facilidad para adaptarse y asociarse con microorganismos como bacterias u hongos en sitios degradados (Ventura-Ríos *et al.*, 2017; González *et al.*, 2018), lo cual coincide con los resultados de las propiedades edáficas obtenidas en Zacapexco (Tabla 5), que indican que el testigo tiene una fertilidad más baja y mayor degradación respecto a la zanja bordo.

Otra familia representativa en el sitio es Asteraceae, la cual se adapta fácilmente a sitios perturbados como parte de los procesos iniciales de sucesión (Mayo-Mendoza *et al.*, 2018), muestra porcentajes similares tanto en la zanja bordo como en el testigo (18 y 18.7%, respectivamente), presentándose en este último mayor cantidad de *Stevia monardifolia*, la cual es una especie que se encuentra principalmente en bosques densos de pino-encino como parte del sotobosque (Sánchez y López, 2003; Mejía-Canales *et al.*, 2018); el género puede ocupar varios hábitats, incluyendo los pastizales, producto de las perturbaciones por la agricultura y el pastoreo (Soejima *et al.*, 2017; Watanabe *et al.*, 2001). En la zanja bordo, destaca *Tagetes lucida* (la cual también se presenta casi en la misma proporción que en el testigo) se caracteriza por ser indicadora de disturbio y como vegetación secundaria en pastizales inducidos donde originalmente fue bosque templado, la cual puede llegar a ser una especie dominante en estas condiciones (Gómez-Sánchez *et al.*, 2011; Álvarez-Lopezello *et al.*, 2016). Las condiciones ambientales en las que suelen presentarse estas dos especies de Asteráceas coinciden con la reconversión de bosque de táscate-pastizal inducido que ha tenido la zona.

En el sitio Matlalohecan predomina la toba ácida, la vegetación es bosque de táscate y el suelo tiene baja fertilidad de acuerdo a los análisis de las propiedades

edáficas de este sitio (Tabla 10); en el estrato arbustivo del sitio testigo domina la familia Cistaceae (29.1%) generalmente están asociadas a algún tipo de disturbio en lugares abiertos, perturbados y con predominio de vegetación secundaria (de Rzedowski y Rzedowski, 1994) fácilmente adaptables a diferentes hábitats (Ruacho-González *et al.*, 2013). También encontramos a la familia Lamiaceae (25.7%) cuyas especies están asociadas a bosques de regeneración (Almazán-Núñez *et al.*, 2009) y espacios abiertos con suelos de sustrato pobre (García-Arévalo *et al.*, 2004), ambas familias con formas de vida caméfitas (Cabrera-Luna *et al.*, 2015); asimismo está la familia Poaceae (22.3%) y su especie *Schizachyrium sp.* como la más representativa, caracterizada por tener una forma de vida hemicriptófitas, presentarse en suelos arenosos con baja fertilidad y vegetación ruderal o con disturbio (Cabrera-Luna *et al.*, 2015; Travieso-Bello *et al.*, 2006); muchas de las condiciones en las que suelen desarrollarse estas familias coinciden con las propiedades edáficas encontradas en este tratamiento, las cuales tienen valores bajos de materia orgánica, C orgánico, N total, P, y la predominancia de la fracción arena (Tabla 10). La familia Poaceae también tiene una alta representatividad en la zanja bordo (66.7%) destacando en proporción los individuos *Eragrostis curvula*, especie introducida de amplia distribución en México con naturalización consumada (Rzedowski y de Rzedowski, 1990), tempranera de rápido rebrote y crecimiento, adaptada a una amplia variedad de suelos, especialmente los arenosos; resistente a bajas condiciones de humedad y usualmente utilizada en sitios erosionados (Beltrán-López *et al.*, 2018), y cuyos géneros suelen restringirse a zonas perturbadas y sitios de transición (García-Arévalo y González-Elizondo *et al.*, 2018). En menor medida se presentan la Cyperaceae (18.9%) con *Cyperus reflexus*, la cual es una especie tolerante de amplia distribución en el centro de México, cuyo género se adapta bien a condiciones de poca humedad y prácticamente a todos los tipos de vegetación, lo que le confiere una mayor tolerancia ecológica (González-Elizondo *et al.*, 2018; González y Rzedowski, 1983). La predominancia de la fracción arena en el suelo de la zanja bordo de este sitio (Tabla 10), y la presencia de Eucalipto disminuye la humedad del suelo (Ceccon y Martínez-Ramos, 1999; Chacón-Vintimilla *et al.*,

2003) si el tipo de suelo no es arcilloso (Martínez-González *et al.*, 2010), lo que en parte puede explicar la fertilidad edáfica de este sitio (Tabla 10).

III.2.2 Estrato arbóreo

La familia Cupressaceae domina en la zanja bordo y testigo de Zacapexco y Matlalohcan, aunque en menor proporción, y casi en su totalidad está representada por *Juniperus deppeana*, especie con amplia distribución en Tlaxcala, cuyo establecimiento puede ser motivada por su adaptación a perturbaciones como pastoreo o tala, colonizando lugares degradados debido a que, al ser un taxón de aparición temprana, representan una fase de sucesión secundaria sin constituir una comunidad clímax (Rzedowski, 2006; Mier y de Pascual, 2020).

En Matlalohcan, en el estrato arbóreo de la zanja bordo predominan las familias Casuarinaceae y Pinaceae. Con las Casuarináceas, destaca *Casuarina equisetifolia*, la cual es una especie introducida y utilizada para la recuperación de suelos erosionados (Méndez *et al.*, 2000) debido a su papel como nodriza en suelos pobres y su asociación con actinomicetos fijadores de nitrógeno, y el aporte significativo de materia orgánica a través de su hojarasca (Suárez y Equihua, 2009); este aporte de broza, sin embargo, también es una barrera física y química al inhibir la germinación de sus propias semillas, sumado a las condiciones hostiles donde generalmente se introduce (Zimmermann, 2016). En cuanto a las Pináceas, *Pinus greggii* es la mayor representante y, aunque es endémica de México, su distribución corresponde a la sierra madre oriental desde el norte de Puebla hasta Coahuila y Nuevo León, siendo una especie introducida en Tlaxcala por programas de reforestación, debido a su fácil adaptación y crecimiento en sitios degradados o condiciones limitantes de humedad (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005; Gómez-Romero *et al.*, 2012), lo que puede generar una mejora en las variables estructurales, funcionales, de riqueza y diversidad de especies de un sitio, sin embargo, también puede ocasionar una baja similitud de especies, respecto a sitios con vegetación original (Ventura-Ríos *et al.*, 2017) y por lo tanto

un recambio de especies (Halffter y Moreno 2005), por lo que su uso debe marcarse como una introducción de alto riesgo (Richardson, 1998).

III.3 Índices de diversidad de especies

Para la diversidad alfa, expresada por el índice de Shannon Wiener, la diversidad y riqueza de especies es menor en el estrato arbóreo de Zacapexco y Matlalohcan (aunque el valor de la zanja bordo de este sitio es ligeramente menor y diferente del testigo), y mayor en el estrato arbustivo de ambos sitios (sin diferencias entre tratamientos) (Tabla 7), en comparación a lo obtenido por Acevedo (2011), que reporta en un bosque templado con sobrepastoreo y deforestación, una riqueza específica en el estrato arbóreo de $S=13$ y una diversidad $H'=2.1$, en tanto que la parte arbustiva reporta una $S=11$ y una $H'=2$.

En el índice de Simpson, Campo y Duval (2014) indican que los valores cercanos a 1 explican la dominancia de una especie sobre las demás y, por tanto, ecosistemas más homogéneos; esto muestra que el estrato arbóreo es más uniforme en Zacapexco, medianamente similar al testigo de Matlalohcan y poco parecido en su zanja bordo, mientras el estrato arbustivo es muy poco homogéneo tanto en Matlalohcan como en Zacapexco, en este último sitio es casi inexistente esta homogeneidad (Tabla 7 y 12). Es importante resaltar que el índice de dominancia de Simpson está inversamente relacionado al índice de equidad de Shannon-Wiener (Melo, 2008), por lo que la dominancia estará relacionada inversamente con la diversidad (Moreno, 2001; Salmerón *et al.*, 2017) y, por lo tanto, ambos índices estarán sujetos a la riqueza específica de los sitios (Pla, 2006). En consecuencia, para el estrato arbóreo, la baja diversidad y media-alta dominancia de Zacapexco y el testigo de Matlalohcan, será por la predominancia de la familia Cupressaceae, mientras la zanja bordo de este último sitio tendrá mayor diversidad y menor dominancia por la presencia de especies de las familias Casuarinaceae, Pinaceae y Cupressaceae. En el caso de la parte arbustiva, la mayor diversidad y menor dominancia de Zacapexco se justificaría por la riqueza específica de las familias Poaceae y Asteraceae; y en Matlalohcan por las familias

Cistaceae, Lamiaceae y Poaceae, mientras que en su zanja bordo será por el número de especies presentes de esta última familia y la Cyperaceae (Tabla 7 y 12).

La baja diversidad y alta dominancia del estrato arbóreo de Zacapexco y el testigo de Matlahocan estarán relacionados con la sucesión ecológica producida después de un disturbio, donde los estados sucesionales jóvenes se caracterizan por la alta dominancia y baja diversidad de especies arbóreas en comparación con etapas maduras (Martínez-Arévalo, 2014; Quintero-Gradilla *et al.*, 2019; Sánchez *et al.*, 2007; Becerra, 2006), así como por las actividades que llevaron a la sobreexplotación de los sitios, las cuales también modifican la diversidad vegetal (Challenger *et al.*, 2009; Altamirano y Lara, 2010). En este sentido, la predominancia en estos sitios de la especie *Juniperus deppeana* (familia Cupressaceae) se puede tomar como un indicador de estos procesos de sucesión, dado que se ha documentado esta especie en sitios degradados con etapas iniciales de sucesión, debido a su facilidad de establecimiento y adaptación a condiciones limitantes (Martínez-y-Pérez *et al.*, 2011; Rzedowski, 2006).

En el estrato arbustivo, las diferencias de diversidad respecto a Acevedo (2011) son consecuencia, de acuerdo a Granados y López (2000) y Chuquilín *et al.* (2017) de los procesos de sucesión secundaria, donde la diversidad de especies herbáceas y arbustivas aumentaría y en consecuencia disminuiría la dominancia (Medina, 2019) en las etapas iniciales, especialmente en sitios con perturbación más reciente como Zacapexco; mientras que, disminuiría la diversidad y aumenta la dominancia en estados más maduros a causa de la exclusión competitiva y la estabilización del ecosistema (Begon *et al.*, 1986), siendo este, el caso del testigo de Matlahocan. Esto se confirmaría por la presencia de especies de las familias Poaceae y Asteraceae en Zacapexco; y Poaceae y Cyperaceae en el testigo de Matlahocan (Tabla 9 y 11), las cuales responden mejor a la presión de alteración (Álvarez-Lopezello *et al.*, 2016) como parte de sus estrategias “r”, lo que les conferiría mayor tolerancia a las condiciones ambientales limitantes de los primeros estados de sucesión secundaria (Vargas-Ríos, 1997; Morláns y María,

2014) y ventajas adaptativas en ambientes con baja competencia interespecífica (por perturbaciones antrópicas), para progresivamente modificar el ambiente a un ecosistema estable (Granados y López, 2000; Morláns y María, 2014); esto indicaría que Zacapexco presentaría etapas iniciales de sucesión ecológica, al igual que el testigo de Matlahocan, y aunque este tenga más años desde el inicio de la perturbación, el sitio no mejora naturalmente, debido a que siguen persistiendo factores de erosión y competencia con especies exóticas, dificultando el proceso de sucesión ecológica (Godwin, 1929).

La zanja bordo de Matlahocan requiere un análisis más exhaustivo, no solo porque la riqueza de especies arbóreas es estadísticamente diferente respecto al testigo, sino porque hace poco más de 40 años se introdujeron especies exóticas en la zona; de acuerdo a Vilá (1998), la introducción de especies en general aumenta la diversidad, especialmente después de una perturbación (Quintero-Gradilla *et al.*, 2019), lo que en consecuencia disminuiría la dominancia (Medina, 2019). Estos factores presentes en la actualidad tendrían que indicar un estado sucesional maduro y traducirse en un aumento de la fertilidad del suelo (Odum, 2014), lo cual no sucede (Tabla 10). Esto puede deberse a que estas reforestaciones se llevaron a cabo con especies exóticas, cuyos rasgos de vida les permitieron hacerse más competitivas para obtener y utilizar nutrientes eficazmente en condiciones ambientales limitantes frente a las especies nativas, sumado a la ausencia de especies que les ofrecieran resistencia biótica (Gutiérrez-Yurrita, 1999; Ríos y Vargas, 2003; León y Vargas, 2009; Capdevila-Argüelles *et al.*, 2013), especialmente el Eucalipto, cuya hojarasca contiene fenoles que dificultan la degradación y descomposición de la materia orgánica, e inhibe el crecimiento de los microorganismos del suelo y especies vegetales nativas, particularmente en el sotobosque (Lima, 1993; Hofstede, 2001; Hernández-Hernández *et al.*, 2008); lo que trae como consecuencia la modificación de la composición florística original y el ecosistema (Gutiérrez-Yurrita, 1999; Fuentes-Ramírez *et al.*, 2010; Capdevila-Argüelles *et al.*, 2013; Carvallo, 2009). Estos factores ocasionaron que esta zona no presente una vía a la sucesión clímax tal como lo plantea Odum (2014), sino un sub-clímax que actuaría

como una fase estabilizada que se encontraría debajo del clímax climático, contrario a lo que sucedería de forma natural. La vegetación exótica es un factor en la zona que se mantiene constante, pero afectando el factor edáfico, resultando una sucesión desviada (Godwin, 1929; Gibson y Brown, 1992; Phillips, 1934). Esto también afecta la estructura del estrato arbustivo, dado que la condición del suelo determina la composición vegetal de la sucesión (Ramos y Orth, 2007; Guariguata y Ostertag, 2002), por lo que la baja fertilidad del suelo de esta zona (Tabla 10) propiciaría la presencia de especies arbustivas con estrategias “r” de las familias Poaceae y Cyperaceae, y que dichas especies están tolerando y adaptándose a condiciones ambientales limitantes propias de las primeras etapas de sucesión secundaria (Vargas-Ríos, 1997; Morláns y María, 2014); lo cual no debería acontecer dado que el tiempo de intervención en esta zona fue hace 40 años, sustentando el proceso de sucesión desviada en la que se haya esta zona.

Es importante aclarar que estudios como los de Sariñana (1999) y Amaya-González (2018), si bien nos dan una aproximación sobre la dominancia de especies en ecosistemas similares a los de este estudio, no se puede hacer una comparación con respecto a los valores, dado que en sus estudios el índice se obtuvo para todas las especies tanto arbóreas como arbustivas, mientras que en este estudio el índice se realizó separando estos estratos.

En cuanto a la diversidad alfa para ambos sitios, la diferencia entre estratos arbóreos y arbustivos y su respectiva diversidad y dominancia de diferentes especies vegetales (Tabla 7 y 12) pueden ser atribuidos a la propia dinámica del ecosistema, en donde la ocupación de especies después de una perturbación será variable e influida por las fases sucesionales, su relevo florístico y composición florística; donde las condiciones ambientales creadas en cada fase serán un factor para la sustitución de especies por otras mejor adaptadas a las nuevas condiciones (Granados y López, 2000; Alcaraz, 2013 EUROPARC, 2015). Esto se ve reflejado en la concentración de individuos de los estratos bajos y altos por diferentes condiciones bióticas y abióticas en diferentes bosques, que pueden ser indicadores de una perturbación (Moreno-Jiménez *et al.*, 2019), en el que la

diversidad alfa puede tener cierta variación dependiendo del estado sucesional en el que se encuentre (Martínez-Arévalo, 2014); con el paso del tiempo, la diversidad incluso puede llegar a decrecer en bosques templados, afectando la composición de especies (Hernández-Salas *et al.*, 2013).

En la diversidad beta y su índice de Sørensen, el estrato arbóreo de Zacapexco tiene mayor similitud de especies entre tratamientos (Tabla 8), mientras que, en Matlahocan es bajo (Tabla 13); en el caso del estrato arbustivo, Zacapexco y Matlahocan tienen poca similitud entre tratamientos (45 y 27%). Al ser este índice un indicativo de las especies en común (Moreno, 2001), se deduce que en el estrato arbóreo de Zacapexco existen más especies compartidas entre la zanja bordo y el testigo, y pocas especies en común entre tratamientos para el estrato arbóreo de Matlahocan, así como en el estrato arbustivo de ambos sitios de estudio. Esta baja similitud puede atribuirse a las alteraciones por el manejo y el desmonte, las cuales afectan el estrato arbustivo y los hábitos de crecimiento, sumado a la persistencia de diversas especies arbustivas/arbóreas (Caseimeiro *et al.*, 2008); en este sentido Matlahocan, al tener reforestación con especies exóticas, si bien pueden llegar a mejorar la diversidad de especies, también puede ocasionar una baja similitud respecto a sitios con vegetación original (Ventura-Ríos *et al.*, 2017). Por otro lado, se ha documentado que conforme una masa forestal se desarrolla, se comparte un número menor de especies, aunque la riqueza específica se mantiene por las diferentes intervenciones (Hernández-Salas *et al.*, 2013); sin embargo, a pesar de que puedan existir pocas especies en común, la alta abundancia de pocas especies podrá ser un factor para tener una alta similitud entre áreas evaluadas (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2010).

III.4 Parámetros de la estructura arbórea

En cuanto a las especies que contribuyen significativamente en la estructura y funcionalidad del ecosistema, destaca el *Juniperus deppeana* al tener un índice de valor de importancia más alto más alto tanto en la zanja bordo y el testigo de Zacapexco (Tabla 6), lo cual es mayor a lo reportado por Miranda *et al.* (2005) con

valores de 43.25 para una reforestación y restauración activa; y menor a lo reportado en el testigo de Matlalohecan, ubicado en este sitio/tratamiento como la tercera especie en valor de importancia (38.74). Estos altos valores se explican debido a que, al ser una especie nativa, tolerante a disturbios antrópicos y suelos con baja fertilidad, su establecimiento en estas condiciones será más factible, creando un efecto de recuperación de zonas degradadas y controlando la erosión, aunque su presencia se asocie más a la vegetación secundaria que a un bosque maduro (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999).

En Matlalohecan, *Casuarina equisetifolia* tiene mayor IVI en la zanja bordo (Tabla 11) debido a la alta densidad de individuos ha^{-1} presentes, resultado de su uso en las reforestaciones de sitios degradados y perturbados para mejorar las condiciones edáficas (Méndez *et al.*, 2000; Suárez y Equihua, 2009; Pérez *et al.*, 2012) por ser una planta pionera que acelera la sucesión y mejora el ecosistema; sin embargo, puede generar disturbios ecológicos si no se sustituye por vegetación nativa a largo plazo (Viñales y Sánchez, 2003). Cercana a la *Casuarina*, *Eucalyptus* spp. tiene el segundo valor de importancia (Tabla 11) lo cual coincide con lo reportado por Saavedra-Romero *et al.* (2019) quienes mencionan en un bosque reforestado con plantas no nativas tuvieron un IVI de 59.88; en este sentido, Bescós *et al.* (2018) refieren que sitios reforestados con *Eucalyptus* sp. suelen dominar el estrato arbóreo sobre otras especies nativas, lo cual según Ceccon y Martínez-Ramos (1999) puede estar relacionado con el tiempo de rotación, el ambiente lumínico, las prácticas de manejo y sus ventajas adaptativas en condiciones limitantes. En este sentido, la casuarina como el eucalipto son árboles introducidos en este sitio, sumadas a las condiciones abióticas, la disponibilidad de recursos y las interacciones bióticas que influyen en la vegetación nativa; se puede generar una sucesión autogénica, reemplazándose una comunidad vegetal por una especie con mayor adaptación y modificando la composición y/o estructura de la comunidad (Ceccon y Martínez-Ramos, 1999; Granados y López, 2000). De esta manera, la presencia de eucalipto y su alto valor de importancia en la zanja bordo de Matlalohecan puede ser la causal de la poca calidad nutrimental del suelo como se ha demostrado en otros estudios,

donde su presencia no supone una mejora significativa de la calidad edáfica, respecto a sitios con vegetación natural o incluso otras plantas no nativas (Hernández-Hernández *et al.*, 2008; Ávila-Campuzano *et al.*, 2011; Ortiz-Torres *et al.*, 2018).

Cupressus benthamii y *Pinus greggi* destacan en IVI en la zanja bordo de Matlalohcan, así como esta última especie también lo hace en el testigo (Tabla 11); al respecto, Fernández-Pérez *et al.* (2013) reportan en bosques templados reforestados con *Cupressus* altos valores de importancia, incluso mayores a árboles nativos de encinos y pinos, lo cual puede ser ocasionado por un posible efecto alelopático de este género sobre el crecimiento y germinación de plántulas de especies nativas (Fournier, 1979 y Pérez-Salicrup *et al.*, 2006; citados por Fernández-Pérez *et al.*, 2013). Si bien *Cupressus benthamii* se encuentra distribuido ampliamente desde el norte de México hasta Centroamérica (Chaves y Fonseca, 1991; Medina y Aranda, 1997), en el estado de Tlaxcala su distribución es muy localizada, especialmente en la sierra de Tlaxco y la Malinche (Ern, 1976; Padilla *et al.*, 2014;) y de manera natural, su valor de importancia es muy poco representativo (Rojas-García y Villers-Ruíz, 2008). Esto indicaría que, en el sitio, la especie fue introducida y su alto valor de importancia se debe principalmente a su plasticidad adaptativa (Zamudio y Carranza, 1994), su tolerancia a suelos con baja fertilidad (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999) y el buen drenaje del sitio (Chaves y Fonseca, 1991) por presentar una textura franco arenosa. En el caso de *Pinus greggii*, no hay estudios sobre su valor de importancia en sitios degradados; sin embargo, en bosques templados conservados de Puebla bajo diferentes manejos forestales, tiene los más bajos IVI (López-Hernández *et al.*, 2017), por lo que, al no tener una distribución natural en Tlaxcala, su introducción debido a su adaptabilidad en sitios degradados puede suponer, como en el caso de todas las especies exóticas y/o invasoras, una ventaja por sus atributos reproductivos, tolerancia ambiental y habilidad competitiva que causarán impactos directos e indirectos en el ecosistema, modificando las redes tróficas, las interacciones suelo-planta, y que terminarán provocando un reemplazo de plantas nativas por otras introducidas con mejores ventajas adaptativas en un ecosistema perturbado

(Ríos y Vargas, 2003; Gutiérrez-Bonilla, 2006; Aguirre Muñoz *et al.*, 2009; León y Vargas, 2009).

En cuanto a la estratificación vertical, los tratamientos de Zacapexco, así como el testigo de Matlahocan presentan una distribución unimodal, la cual es característica de árboles en estado juvenil y rodal regular (Gadow *et al.*, 2007), mientras que, la zanja bordo de este sitio presenta una distribución de alturas multimodal. En este sentido, Grime (1982) citado por García-Velásquez *et al.* (2010) menciona que la ganancia de altura puede estar relacionada con las condiciones ambientales y la capacidad de los individuos de aprovecharlas, en el que la poca disponibilidad de nutrimentos en los sitios de estudio, fomenta el desarrollo de especies no nativas con mejor tasa de crecimiento y tamaño (Vilà, 1998), como es el caso del Eucalipto y Casuarina; asimismo, la mayor cantidad de especies en la distribución multimodal comparada con el número de especies en la distribución unimodal está vinculada con la actividad previa del sitio y su intensidad al afectar la composición de especies y su estructura (Guariguata y Ostertag, 2002). Oyarzún *et al.* (2019) también indican que la presencia de dos o más estratos en bosques templados es indicativa de etapas tempranas de sucesión, y sus especies están conformadas principalmente por aquellas adaptadas a disturbios, por lo que alturas menores a 10 m corresponderían a la regeneración producto de esa perturbación (Quintero-Gradilla *et al.*, 2019).

En cuanto a la distribución horizontal, ambos tratamientos de Zacapexco presentan un diámetro de monte irregular simulando una “J” invertida, mientras que en Matlahocan la distribución es más aproximada a rodales de dos estratos (Gadow *et al.*, 2007). En este sentido, la distribución de diámetros de Zacapexco, así como el testigo de Matlahocan indican un bosque de regeneración y crecimiento en el que los individuos se concentran en las categorías diamétricas más bajas (Méndez-Orsorio *et al.*, 2018) e indican que el sitio se encuentra en fase inicial de sucesión secundaria y regeneración activa, característica de áreas perturbadas en proceso de recuperación (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2011; Méndez-Orsorio *et al.*, 2014). En el caso de la zanja bordo de Matlahocan, si bien presenta

estratos con características tanto de bosque de regeneración como de bosque maduro al tener diámetros mayores a 30 cm (Méndez-Osorio, 2018), esto es producto de la presencia inicial de Eucaliptos, los cuales tienen un rápido crecimiento en su diámetro basal (Louro *et al.*, 2008) y de otras especies latifoliadas presentes en estas categorías diamétricas; las cuales de acuerdo a Castellanos-Bolaños *et al.* (2008) tienen alta capacidad de rebrote e incremento de diámetro, incorporándose fácilmente en categorías mayores en detrimento de especies de coníferas, cuya intolerancia a la sombra y mortalidad las hace menos competitivas. Por otro lado, la distribución irregular de esta área también puede asociarse no solo a la previa existencia de un fuerte disturbio (Juárez-Agis *et al.*, 2017) sino a los efectos de procesos competitivos que tienen ciertas especies durante las diferentes etapas del rodal (Olvera-Vargas y Figueroa-Rangel, 2012).

III.5 Relación entre propiedades edáficas y vegetación

En las correlaciones negativas entre propiedades edáficas (Tabla 15) destaca la existente entre las partículas de arcilla y arena, Rucks *et al.* (2004) mencionan que mientras las partículas del suelo sean menos finas, mayor será la adsorción de cationes, no así en la arena. Por otro lado, una mayor compactación del suelo, expresada por la densidad aparente, repercute negativamente en la MO y el C orgánico, dado que la estructuración de los agregados del suelo se ven influenciados por los bajos porcentajes de MO (Soto-Mora *et al.*, 2016), por lo que su presencia y descomposición por los microorganismos estabilizarán la estructura del suelo (Martínez *et al.*, 2008) y disminuirán la densidad aparente (Trinidad-Santos y Velasco-Velasco, 2016; Galicia *et al.*, 2016), lo cual explica la relación inversa entre estos parámetros. En este sentido, la alta compactación del suelo y la reducción del espacio poroso, expresado en los altos valores de densidad aparente, influirán en la baja circulación de aire y agua en el suelo, los cuales son necesarios para la descomposición de residuos orgánicos como parte del metabolismo microbiano y, por tanto, en el flujo de CO₂, indicador de la actividad

biológica del suelo (Martínez *et al.*, 2008; Hernández-Vigoa *et al.*, 2018), lo que expresaría la relación inversa entre el CO₂ y la densidad aparente.

Referente a la CIC, su valor está estrechamente relacionado con el aumento o disminución de cationes básicos como Mg, K y Ca (Torres *et al.*, 2006), por lo que su correlación positiva con el Mg y negativa con el K está relacionada con el efecto antagónico y reductor que ejerce el Mg sobre el K, cuando hay mayor contenido de Mg en comparación del K (Barragán *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2018), a su vez que la correlación negativa de la CIC con el Ca es conexas con el comportamiento del K al estar ambos elementos estrechamente ligados por las fracciones minerales volcánicas que los conforman (Hidalgo *et al.*, 1999; Torres *et al.*, 2006), por lo que el tipo de correlación que tenga la CIC con el K, también será similar para el Ca; estas situaciones generalmente son causadas por la acción de la vegetación y el intemperismo (Maycotte *et al.*, 2002). Estos supuestos también se repiten en la correlación positiva del Ca y K con el C orgánico al estar relacionadas con el CaCO₃, ya que su precipitación o acumulación estará sujeta a la materia orgánica y, por ende, al C orgánico, dado que estos elementos tienen mayor protección y menos pérdida en suelos calcáreos a causa de la formación de puentes de calcio (Verrecchia *et al.*, 2005; Clough y Skjemstad, 2000; citados por Santos *et al.*, 2018), a su vez que esta forma de fijación también incrementa la liberación de K soluble en suelo (Gutiérrez y González, 1965), relacionándose con el C orgánico (Santos *et al.*, 2018). Finalmente, la correlación positiva entre el pH y la arcilla, se explica por la presencia de minerales aluminosilicatados, del tipo 2:1 que fomentan la acidez del suelo (Ortiz-Solorio, 2019), por lo que, a mayor proporción de estas arcillas, menor pH y, por tanto, mayor acidez.

Para las relaciones entre las propiedades edáficas y la vegetación, los índices de diversidad Sørensen arbóreo y arbustivo tienen una correlación positiva con el pH, a lo que Torrez *et al.* (2010) aducen esta situación al recambio de especies y su consecuente adaptación y desarrollo en suelos con determinados pH, que ocasionará que se establezcan en mayor cantidad aquellas especies vegetales tolerantes a dichas condiciones.

La relación inversa entre la biomasa bacteriana con el índice de dominancia Simpson arbustivo, y positiva con el índice de diversidad Shannon, son ocasionados por la transformación de la vegetación arbustiva y su impacto en las bacterias fijadoras de nitrógeno asociadas a estas especies (Michel *et al.*, 2015; Coyne y Rasskin, 2000) ya que la reducción de la diversidad arbustiva y el reemplazo con especies dominantes incidirán en la fijación de nitrógeno y por lo tanto, en las bacterias nitrificantes asociadas a estas especies (Michel *et al.*, 2015), sobre todo a raíz de disturbios, los cuales acentúan el efecto negativo sobre la diversidad vegetal y los microorganismos del suelo (Coca-Salazar y Carnol, 2017).

En el caso de las correlaciones positivas entre los índices de diversidad beta Sørensen arbóreo y arbustivo con la biomasa bacteriana, si bien no existen estudios que aborden ampliamente su relación, éstas correlaciones pueden deberse a la relación que tiene el nitrógeno con bacterias nitrificantes y especies vegetales asociadas (Coyne y Rasskin, 2000), donde las prácticas de manejo, la consecuente modificación de la cubierta vegetal y el recambio de especies derivado de estas acciones, pueden favorecer o decrecer la fijación de nitrógeno, y por ende, la biomasa bacteriana asociada a estos procesos (Cruz-Ruiz *et al.*, 2012; Gelviz-Gelvez y Pavón-Hernández, 2013; Michel *et al.*, 2015; Gaspar-Santos *et al.*, 2015).

El análisis de componentes principales de las propiedades edáficas indica que el efecto de la CIC sobre los sitios de estudio puede estar relacionado con su alta presencia por el tipo de material parental (Etchevers *et al.*, 1992b) en el que el Ca aumenta la capacidad de intercambio y su retención (Mantilla-Paredes *et al.*, 2009); asimismo, la baja MO indica que la CIC estará dada principalmente por la fracción mineral del suelo (Ortiz-Solorio, 2019); al respecto, Rosero *et al.* (2020) encuentra que la variabilidad de propiedades edáficas en el CP1 en zonas boscosas es similar (52%) y de igual manera está influido por propiedades edáficas como la CIC y el Ca, con valores de correlación variable de 0.97 y 0.86,

respectivamente, similar a lo reportado en este estudio (Tabla 18), además de estar influido también por la dinámica de la materia orgánica.

El análisis de componentes de las variables edáficas y de vegetación indican que la dominancia arbórea, el pH y el nitrógeno, puede afectar a la biomasa bacteriana y la diversidad arbustiva; en este sentido, las relaciones que existen en este estudio entre la dominancia de especies arbóreas y su repercusión en la diversidad arbustiva pueden estar relacionados con las prácticas de manejo (Díaz *et al.*, 2003) en donde una especie, al aumentar su dominancia, puede afectar la diversidad de otras especies (Monárrez-González *et al.*, 2018), lo cual está ligado a los procesos ecológicos claves como la competencia, depredación y sucesión (Leyva-López *et al.*, 2010). Salmeron (2019) menciona que en comunidades donde hay dominancia de una especie, se presenta una pobre diversidad de hojarasca, y, por tanto, baja calidad nutrimental del suelo y de sus microorganismos descomponedores; sin embargo, en suelos degradados, la reforestación con una o varias especies, puede ocasionar no solo la dominancia de ciertas especies, sino también fomentar asociaciones con algunas especies de bacterias u hongos y fijación de nitrógeno al suelo (Ferrari y Wall, 2015), por lo que en ambas situaciones se puede explicar la influencia que tiene la dominancia arbórea en propiedades como la biomasa bacteriana; Casermeiro *et al.* (2008) mencionan que la alta diversidad de especies arbustivas influirán en el contenido de N, producto de la presencia de especies herbáceas y arbustivas asociadas con microorganismos fijadores de este nutriente, en el que el pH tendrá una repercusión sobre los mismos al poder favorecer o perjudicar su actividad (Osorio, 2012), especialmente las bacterias en sitios con perturbación (Romero *et al.*, 2009).

Finalmente, la afectación que tienen parámetros como la densidad, cobertura y diversidad arbórea sobre la dominancia de arbustivas puede estar relacionado con el efecto que tiene el arbolado en la modificación de algunas condiciones abióticas como iluminación, temperatura, aire y condiciones edáficas (García-Mares *et al.*, 1988), donde un aumento de los parámetros arbóreos propiciarán que algunas

especies arbustivas tengan más bajo crecimiento, principalmente bajo las copas de los árboles, propiciando que con el tiempo la riqueza sea más baja (Díaz *et al.*, 2003) y por tanto, aumentan la dominancia de otras especies.

IV CONCLUSIONES

Las propiedades edáficas indican que las obras establecidas en los sitios de Gustavo Díaz Ordaz y Zacapexco aún no han mejorado la calidad edáfica, aunque la zanja bordo de Zacapexco presentó una tendencia positiva respecto al testigo, representando un efecto de la obra y las condiciones bióticas y abióticas, las cuales seguirán influyendo en los procesos de rehabilitación del suelo.

En Matlalohcan, a pesar de haber transcurrido 40 años aproximadamente desde el establecimiento de la zanja bordo y la reforestación de especies exóticas llevada a cabo a la par, no se ha mejorado la calidad del suelo, lo que influye negativamente incluso en las propiedades biológicas, las cuales suelen ser más sensibles a los procesos de restauración.

La estructura vegetativa y de diversidad en Zacapexco como Matlalohcan presentó fases iniciales de sucesión ecológica secundaria; esto ha influido en la estructura vertical y horizontal arbórea, en los índices de valor de importancia y la diversidad de especies en el estrato arbustivo *versus* el arbóreo, donde hay mayor dominancia y mayores valores de importancia de pocas especies arbóreas con excepción de Matlalohcan, donde a causa de la reforestación con especies exóticas se ha influido negativamente en el suelo e incluso en la estructura de la comunidad vegetal reflejado en los índices de similitud de Sørensen, causando una sucesión desviada y reflejándose en la calidad del suelo.

A través de los análisis de componentes principales se observó la dinámica en las características del suelo y su relación con la diversidad y estructura vegetal en cada comunidad, como efecto de las obras de conservación.

V REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo H. J. (2011). *Estructura y composición de la vegetación en la subcuenca Santiago Bayacora (Durango) a través de un gradiente altitudinal* [Tesis de Doctorado. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Instituto Politécnico Nacional].
- Acevedo-Sandoval, O., Valera-Pérez, M. A., y Prieto-García, F. (2010). Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlan, Hidalgo, México. *Universidad y ciencia*, 26(2), 137-150.
- Aguirre-Muñoz, A., Alfaro, M., Gutiérrez, E., y Morales, S. (2009). Especies exóticas invasoras: impactos sobre las poblaciones de flora y fauna, los procesos ecológicos y la economía. En: J. Sarukhán (Comp.). *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 277-318). CONABIO.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Pando-Moreno, M., Aguirre-Calderón, Ó. A., Treviño-Garza, E. J., y García-Galindo, P. C. (2010). Efecto de la restauración ecológica post-incendio en la diversidad arbórea del Parque Ecológico Chipinque, México. *Madera y bosques*, 16(4), 39-54.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Valdecantos-Dema, A., Pando-Moreno, M., Aguirre-Calderón, O., y Treviño-Garza, E. J. (2011). Caracterización de regeneración leñosa post-incendio de un ecosistema templado del Parque Ecológico Chipinque, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 31-39.

- Alcaraz, F. J. (2013). Sucesión (Sin dinámica). *Geobotánica, Tema 13*. Universidad de Murcia. España.
- Almazán-Núñez, R. C., Puebla-Olivares, F., y Almazán-Juárez, Á. (2009). Diversidad de aves en bosques de pino-encino del centro de Guerrero, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 25(1), 123-142.
- Alonso, J. A., Bermúdez, F. L., y Rafaelli, S. (2011). *La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación (Vol. 4)*. Editum. Murcia.
- Altamirano, A., y Lara, A. (2010). Deforestación en ecosistemas templados de la precordillera andina del centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 31(1), 53-64.
- Alvarado C., M., Colmenero R., J. A., y Valderrábano A., M. (2007). La erosión del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3): 317-326.
- Álvarez-Lopezello, J., Rivas-Manzano, I. V., Aguilera-Gómez, L. I., y González-Ledesma, M. (2016). Diversidad y estructura de un pastizal en El Cerrillo, Piedras Blancas, Estado de México, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 980-989.
- Álvarez-Sánchez, M. E., y Marín-Campos, A. (2011). *Manual de procedimientos analíticos de suelo y planta*. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco.
- Amaya-González, Y. (2018). *Contenido de carbono y diversidad estructural de la vegetación en un área bajo manejo forestal, Chihuahua, México* [Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León].
- Ávila-Campuzano, G. R., Gutiérrez-Castorena, M., Ortiz-Solorio, C. A., Ángeles-Cervantes, E., y Sánchez-Guzmán, P. (2011). Evaluación de las

- reforestaciones en la formación de suelo a partir de tepetates. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(3), 303-312.
- Báez, A., Hidalgo, C., Matus, F., Prat, C., y Etchevers, J. (2011). Fraccionamiento y acumulación de carbono orgánico en tres suelos volcánicos degradados de México. En: J. A. Gallardo (Ed.). *Materia orgánica edáfica y captura de carbono en sistemas Iberoamericanos* (pp. 61-79). SiFyQA. Salamanca, España.
- Báez-Pérez, A., González-Chávez, M. C., Etchevers-Barra, J. D., Prat, C., y Hidalgo-Moreno, C. (2010). Glomalina y secuestro de carbono en tepetates cultivados. *Agrociencia*, 44(5), 517-529.
- Barajas-Guzmán, G., Hernández-Rosales, D., Paredes-García, S., Peña-Becerril, J. C., y Álvarez-Sánchez, J. (2020). CO₂ 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.
- Barragán, O. A. D., Robayo, D. M. M., y Caballero, J. A. L. (2009). Acción de microorganismos eficientes sobre la actividad de intercambio catiónico en plántulas de acacia (*Acacia melanoxylon*) para la recuperación de un suelo del municipio de Mondoñedo, Cundinamarca. *Colombia Forestal*, 12, 141-160.
- Becerra, P. I. (2006). Invasión de árboles alóctonos en una cuenca pre-andina de Chile central. *Gayana. Botánica*, 63(2), 161-174.
- Begon, M., Harper, J. L., y Townsend, C. R. (1986). *Ecology. Individuals, populations and communities*. Blackwell Scientific Publications. Boston.

- Beltrán-López, S., García-Díaz, C. A., Loredó-Osti, C., Urrutia-Morales, J., Hernández-Alatorre, J. A., y Gámez-Vázquez, H. G. (2018). "Llorón Imperial", *Eragrostis curvula* (Schrad) Nees, variedad de pasto para zonas áridas y semiáridas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9(2), 400-407.
- Benefield, C. B., Howard, P. J. A., y Howard, D. M. (1977). The estimation of dehydrogenase activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 9(1), 67–70.
- Bescós, P., González-García, V., Lago-Vallejo, B., López-Alonso, R., López-Tamargo, S., Manrique-Hernández, A., Martínez C. R., y Navarro-Moro, C. (2018). *Análisis comparativo entre el Eucaliptal y bosque autóctono en Asturias*. Facultad de Biología. Universidad de Oviedo.
- Bhattarai, A., Bhattarai, B., y Pandey, S. (2015). Variation of soil microbial population in different soil horizons. *Journal Microbiology Experimental*, 2(2), 44.
- Błońska, E., y Januszek, K. (2013). Usability of enzyme activity in estimation of forest soil quality. *Folia Forestalia Polonica, Seria A-Forestry*, 55(1), 18-26.
- Bonilla-Correa, C. R., Gómez-López, E. D., y Sánchez de Prager, M. (2002). *El suelo: los organismos que lo habitan*. Universidad Nacional de Colombia: Instituto de Estudios Ambientales. Palmira, Colombia. ISSN 1657-2394.
- Bremer J. M. (1965). Total, Nitrogen. En: C.A. Black (ed.). *Methods of Soil Analysis (part 2). Chemical and Microbiological Properties* (pp. 1149–1178). American Society of Agronomy Inc. Publisher. Madison, Wisconsin.
- Brown, A. (2019). *Soil erosion*. Salem Press Encyclopedia of Science. Armenia, NY.

- Cabrera-Luna, J. A., Huerta-Cantera, H. E., Salinas-Soto, P., y Olvera-Valerio, D. (2015). Flora y vegetación de la sierra El Rincón, Querétaro y Michoacán, México. *Botanical Sciences*, 93(3), 615-632.
- Calderón, G., y Rzedowski, J. (2001). *Flora fanerogámica del Valle de México*. Comisión Nacional para el Estudio de la Biodiversidad e Instituto de Ecología, AC. México.
- Callo, C. D. (2013). Prácticas agroforestales y especies de uso múltiple para la rehabilitación y conservación de suelos volcánicos en Adolfo López Mateos, Tlaxcala: percepción de los agricultores. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 13(26), 119-134.
- Camacho-Ballesteros, S. E. (2018). La especie *Pennisetum clandestinum* en la restauración ecológica. *Amazonia Investiga*, 7(14), 265-273.
- Campillo, R., y Sadzawka, A. (2006). La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados. Manejo de los recursos naturales en el sistema de incentivos para la recuperación de suelos degradados de la Araucanía. *Serie Actas*, 38, 44-60.
- Campo, A. M., y Duval, V. S. (2014). Diversidad y valor de importancia para la conservación de la vegetación natural: Parque Nacional Lihué Calel (Argentina). *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* 34(2), 25-42.
- Capdevila-Argüelles, L., Zilletti, B., y Suárez-Álvarez, V. Á. (2013). Causas de la pérdida de biodiversidad: Especies Exóticas Invasoras. *Memorias Real Sociedad Española de Historia Natural*. 2(10), 55-76.

- Carvalho, G. (2009). Especies exóticas e invasiones biológicas. *Ciencia Ahora*, 23(12), 15-21.
- Casermeiro, J., De Petre, A. A., Spahn, E., y Valenti, R. (2008). Efectos del desmonte sobre la vegetación y el suelo. *Forest Systems*, 10(2), 233-244.
- Casida Jr., L. E., Klein, D. A., y Santoro, T. (1964). Soil dehydrogenase activity. *Soil science*, 98(6), 371-376.
- Castellanos-Bolaños, J. F., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jiménez-Pérez, J., Musalem-Santiago, M., y López-Aguillón, R. (2008). Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 14(2), 51-63.
- Ceccon, E., y Martínez-Ramos, M. (1999). Aspectos ambientales referentes al establecimiento de plantaciones de eucalipto de gran escala en áreas tropicales: aplicación al caso de México. *Interciencia*, 24(6), 352-359.
- Celaya-Michel, H., y Castellanos-Villegas, A. E. (2011). Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 343-356.
- Chacón-Vintimilla, G., Gagnon, D., Paré, D., y Proulx, D. (2003). Impacto de la deforestación, pastizales, plantaciones de Eucalipto y Pino en suelos de bosque montano alto, en la Sierra Sur del Ecuador. *Revista de Investigaciones de la Universidad del Azuay*, 11, 19-34.
- Challenger, A., Dirzo, R., López, J. C., Mendoza, E., Lira-Noriega, A., y Cruz, I. (2009). Factores de cambio y estado de la biodiversidad. *Capital Natural de México*, 2, 37-73.

- Chaves, E., y Fonseca, W. (1991). *Ciprés: Cupressus lusitanica Mill.: especie de árbol de uso múltiple en América Central (Vol. 7)*. Catie. Turrialba, Costa Rica.
- Chuquilín, E., Mostacero, J., Ñique, M., Lévano, J., y Puerta, R. (2017). Modelo preliminar de sucesión ecológica de la vegetación herbácea en bosques fragmentados. *Revista Ciencia y Tecnología*, 12(2), 171-183.
- Cintora, G. C. L. (2016). *Informe de resultados del monitoreo de restauración forestal y reconversión productiva 2016*. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco.
- Cisneros, J. M., Cholaky, C. G., Cantero Gutiérrez, A., González, J., Reynero, M., Diez, A., y Bergesio, L. (2012). *Erosión Hídrica. Principios y técnicas de manejo*. UniRío Editora. Río Cuarto, Argentina.
- Coca-Salazar, A. A., y Carnol, M. (2017). *Soil microbial activity in agricultural, fallow and forest soils in a potato-producing region, Cochabamba-Bolivia*. Memories of VIII Bolivian Congress of Soil Sciences. Santa Cruz, Bolivia. 13-15 de noviembre 2017.
- CONAFOR. (2007). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales*. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco.
- CONAFOR. (2012). *Anexo técnico: Ejido Gustavo Díaz Ordaz*. Gerencia estatal Tlaxcala: Comisión Nacional Forestal. Tlaxcala, Tlaxcala.
- CONAFOR. (2015). *Anexo técnico: Rancho Zacapexco*. Gerencia estatal Tlaxcala: Comisión Nacional Forestal. Tlaxcala, Tlaxcala.
- CONAFOR. (2018). *Compensación ambiental*. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco.

- Cotler, H., S. Martínez T. y V. Bunge (2015). Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trincheras. *Investigaciones Geográficas*, 2015 (88), 6-18.
- Coyne, M., y Rasskin, M. (2000). *Microbiología del suelo: un enfoque exploratorio*. Paraninfo. Madrid, España.
- Cruz, A. B., Barra, J. E., del Castillo, R. F., y Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista ecosistemas*, 13(2), 90-97.
- Cruz-Ruiz, E., Cruz-Ruiz, A., Aguilera-Gómez, L. I., Norman-Mondragón, H. T., Velázquez, R. A., Nava-Bernal, G., Dendooven, L., & Reyes-Reyes, B. G. (2012). Efecto en las características edáficas de un bosque templado por el cambio de uso de suelo. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 189-197.
- Curtis, J. T., y McIntosh, R. P. (1951). An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 32(3), 476-496.
- Daglio, G., Sterren, M., y Benintende, S. (2005). Almacenamiento de muestras de suelo: incidencia sobre la cuantificación de biomasa microbiana. *Agriscientia*, 22(2), 63-68.
- De León G, F., y Etchevers, J. D. (1999). *Materia orgánica en el suelo y disponibilidad de nitrógeno*. Memorias del XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón, Chile. (8-12 de noviembre 1999).
- de Rzedowski, G. C., y Rzedowski, J. (1994). *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán: Fascículo 6. Cistaceae AL Juss*. UNAM. México, D.F.
- Di Gerónimo, P. F., Videla, C., Fernández, M. E., Zamuner, E. C., y Laclau, P. (2018). Cambios en propiedades químicas y bioquímicas del suelo asociados al reemplazo de pastizales naturales por *Pinus radiata* D. Don y

- rotaciones agrícolas. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 34(2), 89-101.
- Díaz, M., Pulido, F. J., y Marañón, T. (2003). Diversidad biológica y sostenibilidad ecológica y económica de los sistemas adehesados. *Revista Ecosistemas*, 12(3).
- Do Prado, L., y da Veiga, M. (1992). *Erosión y pérdida de fertilidad del suelo*. FAO.
- DOF. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*, 1-85.
- DOF. (2006). Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. *Diario Oficial de la Federación*, 1-33.
- DOF. (2007). Norma Mexicana NMX-FF-109- SCFI-2007. Humus de lombriz (lombricomposta) - especificaciones y métodos de prueba. *Diario Oficial de la Federación*, 1-28.
- Ern, H. (1976). Descripción de la vegetación montañosa en los estados mexicanos de Puebla y Tlaxcala. *Willdenowia. Beiheft*, 1-128.
- Escamilla-Sarabia, G., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., y Gama-Castro, J. (2002). Tepetates del glacis de Buenavista, Morelos: interacción de procesos geomorfológicos y pedogenéticos. *Investigaciones geográficas*, (48), 76-89.
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., y Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831.

- Etchevers B.J. D., Cruz H, L., Mares A, J., y Zebrowski, C. (1992a). Fertilidad de los tepetates: 1. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (Mexico). *Terra*, 10 (spécial), 379-384.
- Etchevers B., J. D., López R, R. M., Zebrowski, C., y Peña Hernández, D. (1992b). Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y Tlaxcala, México. *Terra*, 10(spécial), 171-177.
- Etchevers, B., J. D., Zebrowski, C., Hidalgo M, C., y Quantin, P. (1992c). Fertilidad de los tepetates: 2. Situación del fósforo y del potasio en tepetates de México y Tlaxcala (Mexico). *Terra*, 10(spécial), 385-391.
- Etchevers, B. J. D. (1999). Indicadores de la calidad del suelo. En: C. Siebe, C. R. Humberto, G. Toledo, J. Etchevers, K. Oleschko. (Eds.). *Conservación y restauración de suelos* (pp. 239-262). UNAM-SEMARNAP. México, D.F.
- Etchevers, B. J. D. y Padilla, C.J. (2007). Diagnóstico de la fertilidad del suelo. En: G.G. Alcántara y L.I. Trejo-Téllez (Eds.). *Nutrición de cultivos* (pp.249-272). Mundi-Prensa. México.
- EUROPARC. (2015). *El papel de los bosques maduros en la conservación de la biodiversidad*. Grupo de Conservación de EUROPARC-España. <http://www.redeuroparc.org/gestionforestal.jsp>
- FAO. (1993). *Erosión de suelos en América Latina. Tema 2: Erosión y pérdida de la fertilidad del suelo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. ISBN 92-854-3001-5.
- FAO. (2015). *Estado mundial del recurso suelo (EMRS). Resumen técnico*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma.

- Fassbender, H. W., y Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. IICA. San José C.R.
- Fernández-Pérez, L., Ramírez-Marcial, N., y González-Espinosa, M. (2013). Reforestación con *Cupressus lusitanica* y su influencia en la diversidad del bosque de pino-encino en Los Altos de Chiapas, México. *Botanical Sciences*, 91(2), 207-216.
- Ferrari, A. E., y Wall, L. G. (2015). Utilización de árboles fijadores de nitrógeno para la revegetación de suelos degradados. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 105(2), 63-87.
- Foster, A., B. (2013). *Métodos aprobados de conservación de suelos 2a ed.* Editorial Trillas. México.
- Foth, H. D., y Turk, L. M. (1985). *Fundamentos de la ciencia del suelo*. CECSA. México.
- Friedel, J. K., Mölter, K., y Fischer, W. R. (1994). Comparison and improvement of methods for determining soil dehydrogenase activity by using triphenyltetrazolium chloride and idonitrotetrazolium chloride. *Biology and fertility of soils*, 18(4), 291-296.
- Fuentes-Ramírez, A., Pauchard, A., Marticorena, A., y Sánchez, P. (2010). Relación entre la invasión de *Acacia dealbata* Link (Fabaceae: Mimosoideae) y la riqueza de especies vegetales en el centro-sur de Chile. *Gayana. Botánica*, 67(2), 188-197.
- Gadow, K. V., Sánchez, O. S., y Álvarez, J. G. (2007). *Estructura y crecimiento del bosque*. Universidad de Göttingen. Göttingen, Alemania.

- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V., y Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1-29.
- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., y Díaz-Ortega, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 133-145.
- García, F. R., Gómez, G. H. S., Montiel, E. G., Rodríguez, A. V., y Ponce, J. I. P. (2017). La ciencia del suelo en el ciclo del carbono de México. *Elementos para Políticas Públicas*, 1(2), 131-158.
- García, I., y Gil, S. (2003). *Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: Medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- García, S. C. (2011). Bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno. *Cuadernos del Tomás*, (3), 173-186.
- García, Y., Ramírez, W., y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y forrajes*, 35(2), 125-138.
- García-Arévalo, A., Mendoza-Contreras, J. J., y Nocedal, J. (2004). Asociaciones vegetales de los bosques del municipio de Guanaceví, Durango. *Madera y Bosques*, 10(1), 21-34.

- García-Arévalo, A., y González-Elizondo, S. (1991). Flora y vegetación de la cima del Cerro Potosí, Nuevo León, México. *Acta Botánica Mexicana*, (13), 53-74.
- García-Cruz, A., Flores-Román, D., García-Calderón, N. E., y Ferrera-Cerrato, R. (2008). Efecto de enmiendas orgánicas, higuera y micorriza sobre las características de un tepetate. *Terra Latinoamericana*, 26(4), 309-315.
- García-Gallegos, E., Hernández-Acosta, E., Acevedo-Sandoval, O. A., Prieto-García, F., y Luna-Zendejas, H. S. (2014). Cu, Fe, Mn y Zn en suelos agrícolas localizados al noroeste de Tlaxcala, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1(2), 206-212.
- García-Mares, M. R. T., y de Luis Calabuig, E. (1988). Influencia de la sabina (*Juniperus thurifera*) sobre el estrato herbáceo en función de la orientación. *Anales de Biología*, 15, 179-189.
- García-Velásquez, L. M., Ríos-Quintana, A., y Molina-Rico, L. J. (2010). Structure, plant composition and leaf litter decomposition in soil, at two sites of an andean cloud forest (reforested and in spontaneous succession), in Peñas Blancas, Calarcá (Quindío), Colombia. *Actualidades Biológicas*, 32(93), 147-164.
- Gáspari, F., Vázquez, M., y Lanfranco, J. (2006). Relación entre la erosión hídrica superficial y la distribución de la pérdida de calcio, magnesio y potasio del suelo. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 106(1), 47-56.
- Gaspar-Santos, E. S., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., y Álvarez-Solís, J. D. (2015). Acumulación y descomposición de hojarasca en

- bosques secundarios del sur de la Sierra Madre de Chiapas, México. *Bosque (Valdivia)*, 36(3), 467-480.
- Gelviz-Gelvez, S. M., y Pavón Hernández, N. P. (2013). Diversidad de especies arbustivas en una zona semiárida del centro de México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(3), 323-335.
- Gibson, C. W. D., y Brown, V. K. (1992). Grazing and vegetation change: deflected or modified succession. *Journal of Applied Ecology*, 120-131.
- Godwin, H. (1929). The sub-climax and deflected succession. *Journal of Ecology*, 17(1), 144-147.
- Gómez-Romero, M., Soto-Correa, J. C., Blanco-García, J. A., Sáenz-Romero, C., Villegas, J., y Lindig-Cisneros, R. (2012). Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia*, 46(8), 795-807.
- Gómez-Sánchez, M., Suárez-Martínez, A. L., y Martínez-Montes, E. I. (2011). Análisis florístico de un pastizal del estado de Querétaro, México. *Journal of the Botanical Research*, 707-717.
- Gong, P. (1997). Dehydrogenase activity in soil: a comparison between the TTC and INT assay under their optimum conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 29(2), 211-214.
- González Zarur, M. (2016). 6° *Informe de Gobierno*. Gobierno del Estado de Tlaxcala. Tlaxcala.
- González, A. R. (2006). *Ecología: Métodos de muestreo y análisis de poblaciones y comunidades*. Pontificia Universidad Javeriana.
- González, L. C., Cuadros, J. F., Rincón, F. R., y Montano, L. R. S. (2018). Gramíneas nativas en suelos desnudos al borde de una carretera y su

- simbiosis con micorrizas. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 21(1), 253-257.
- González, S., y Rzedowski, J. (1983). Some ecological and phytogeographical aspects of Cyperaceae species in the Valley of Mexico. *Botanical Sciences*, (45), 39-47.
- González-Elizondo, M. S., Reznicek, A. A., y Tena-Flores, J. A. (2018). Cyperaceae in Mexico: Diversity and distribution. *Botanical Sciences*, 96(2), 305-331.
- González-Romero, J., Lucas-Borja, M. E., Plaza-Álvarez, P. A., Sagra, J., Moya, D., y De Las Heras, J. (2018). Temporal effects of post-fire check dam construction on soil functionality in SE Spain. *Science Environment*, 642, 117-124.
- Granados, S. D., y López, R. G. F. (2000). *Sucesión ecológica: dinámica del ecosistema*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Guariguata, M. R., y Ostertag, R. (2002). Sucesión secundaria. *Ecología y Conservación de Bosques Neotropicales*, 591-623.
- Gutiérrez-Bonilla, F. D. P. (2006). *Estado de conocimiento de especies invasoras. Propuesta de lineamientos para el control de los impactos*. Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt. Bogotá, Colombia. ISBN 958-8151-74-0.
- Gutiérrez-Castorena, M. (1989). Estudio micromorfológico de los cementates de algunos tepetates del Valle de México y Tlaxcala. *Agrociencia*, 1(2), 91-105.

- Gutiérrez, G. S., y González, A. (1965). Influencia del carbonato de calcio en las propiedades químicas de un suelo de la terraza de Villa-Rica (Cauca). *Acta Agronómica*, 15(1-4), 33-59.
- Gutiérrez-Yurrita, P. J. (1999). Consecuencias de la introducción de especies. *Biología Informa*, 25, 1-6.
- Halfpeter, G., y Moreno, E. C. (2005). Significado biológico de las diversidades Alfa, Beta y Gamma. En: J. Soberón, P. Koleff, y A. Melic. (Eds.). *Sobre Diversidad Biológica: el Significado de las Diversidades Alfa, Beta y Gamma* (pp. 5-18). Sociedad Entomológica Aragonesa. Zaragoza, España. ISBN 84-932807-7-1.
- Hernández-Flores, L., Munive-Hernández, J. A., Sandoval-Castro, E., Martínez-Carrera, D., y Villegas-Hernández, M. (2013). Efecto de las prácticas agrícolas sobre las poblaciones bacterianas del suelo en sistemas de cultivo en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(3), 353-365.
- Hernández-Hernández, R. M., Ramírez, E., Castro, I., y Cano, S. (2008). Cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pinos (*Pinus caribaea*) y eucaliptos (*Eucalyptus robusta*). *Agrociencia*, 42(3), 253-266.
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., y Domínguez-Pereda, L. A. (2013). Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), 189-200.

- Hernández-Vigoa, G., Cabrera-Dávila, G. D. L. C., Izquierdo-Brito, I., Socarrás-Rivero, A. A., Hernández-Martínez, L., y Sánchez-Rendón, J. A. (2018). Indicadores edáficos después de la conversión de un pastizal a sistemas agroecológicos. *Pastos y Forrajes*, 41(1), 3-12.
- Herrera, A., Y., y Peterson, P. M. (2007). *Muhlenbergia* (Poaceae) de Chihuahua, México. *Sida Botanical Miscellany*, 29, 1-109. ISBN 978-1889878-31-7
- Hidalgo, C., Etchevers B, J. D., Pérez O, M. A., Vera, A., Flores S, D., y Navarro G, H. (1999). Restauración de suelos volcánicos endurecidos. La experiencia del centro de México: Proyecto tepetates. En: C. Siebe, C. R. Humberto, G. Toledo, J. Etchevers, K. Oleschko. (Eds.). *Conservación y restauración de suelos* (pp. 451-471). UNAM-SEMARNAP. México, D.F.
- Hofstede, R. (2001). El impacto de las actividades humanas sobre el páramo. En: P. Mena, G. Medina, R. Hofstede (Eds.). *Los Páramos del Ecuador. Particularidades, Problemas y Perspectivas* (pp. 161-185). Abya Yala/Proyecto Páramo. Quito. ISBN 9978-04-727-1
- Honorato, P. (2000). *Manual de edafología* (6° ed.). Alfaomega. Chile.
- INECC. (2007). *Capítulo primero: el suelo*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap1.html>
- INEGI. (2009a). *Prontuario de información municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Atlangatepec. Tlaxcala*. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI. (2009b). *Prontuario de información municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Emiliano Zapata. Tlaxcala*. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. Aguascalientes, México.

- INEGI. (2009c). *Prontuario de información municipal de los Estados unidos mexicanos. Tetla de la Solidaridad. Tlaxcala*. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. Aguascalientes, México.
- Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia: Facultad de ciencias. Medellín, Colombia.
- Jiménez-Barrios, C. (2010). *Evaluación de obras de conservación de suelos en el distrito de Coixtlahuaca (Oaxaca, México) y bases para actuaciones futuras* [Tesis de Licenciatura. Escuela técnica superior de ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid].
- Juárez, M., Franco, M., Jaens, T. y Palmira, V. (2009). Manual de prácticas de laboratorio de química ambiental II. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. 24-31 pp.
- Juárez-Agis, A., Sánchez, S. G., Carbajal, X. O., y Torres, J. Z. (2017). Estructura y regeneración natural de *Peltogyne* mexicana en el Parque Nacional el Veladero, Acapulco, Guerrero/Structure and natural regeneration of *Peltogyne* mexicana in the Veladero Nacional Park, Acapulco, Guerrero. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 6(12), 92-114.
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., y Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61.
- Kumar, S., Chaudhuri, S., y Maiti, S. K. (2013). Soil dehydrogenase enzyme activity in natural and mine soil-a review. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 13(7), 898-906.

- León, O., y Vargas, O. (2009). Las especies invasoras: un reto para la restauración ecológica. En: O. Vargas. (Ed.). *Restauración Ecológica en Zonas Invasadas por Retamo Espinoso y Plantaciones Forestales de Especies Exóticas* (pp. 19-38). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Leyva-López, J. C., Velázquez-Martínez, A., y Ángeles-Pérez, G. (2010). Patrones de diversidad de la regeneración natural en rodales mezclados de pinos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 227-239.
- Lima, W. D. P. (1993). *Impacto ambiental do eucalipto 2nd ed.* Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- López, A. J. (2005). *Manual de edafología*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla.
- López, R. (2002). *Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
- López-Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Monarrez-González, J. C., González-Tagle, M. A., y Jiménez-Pérez, J. (2017). Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 39-51.
- Louro, S. A., Fandiño, V. A., González, A. B. C., y Rodríguez, J. M. (2008). Control de eucalipto y reforestación con especies caducifolias: innovación y efectos ecológicos. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (28), 37-42.

- Mambu, S. M. (2014). Soil dehydrogenase activity: A comparison between the TTC and INT method. A review. *Jurnal Ilmiah Sains*, 14(2), 87-94.
- Mantilla-Paredes, A. J., Cardona, G., Peña-Venegas, C. P., Murcia, U., Rodríguez, M., y Zambrano, M. M. (2009). Distribución de bacterias potencialmente fijadoras de nitrógeno y su relación con parámetros fisicoquímicos en suelos con tres coberturas vegetales en el sur de la Amazonia colombiana. *Revista de Biología Tropical*, 57(4), 915-927.
- March M. I., y Martínez J., M. (2007). *Especies invasoras de alto impacto a la biodiversidad: prioridades en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. ISBN 978-968-5536-92-9
- Martínez, H. E., Fuentes, J. P., y Acevedo, H. E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.
- Martínez, M. M. R., Fernández, R. D. S. y Ramírez, O. M. (2009). *Catálogo de obras y prácticas de conservación de suelo y agua*. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco.
- Martínez-Arévalo, J. V. (2014). Sucesión vegetal en bordes de bosques de pinabete (*Abies guatemalensis* Rehder) del occidente de Guatemala. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(23), 64-77.
- Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F., y Ortiz-Medel, J. (2010). Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la cuenca La Esperanza. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(4), 89-103.

- Martínez-y-Pérez, J. L., Castillo-Campos, G., Santiago-Martínez, M., y Hernández-Cuevas, L. V. (2011). Análisis florístico en tepetates del estado de Tlaxcala. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(2), 623-637.
- Matteucci, S. D., y Colma, A. (1982). *Metodología para el estudio de la vegetación* (Vol. 22). Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos. Washington, DC.
- Matus, F. J., y Maire, C. R. (2000). Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica*, 60(2), 112-126.
- Matus, F., Hidalgo, C., Monreal, C., Estrada, I., Fuentes, M., y Etchevers, J. (2011). Impacto del uso del suelo sobre las fracciones físicas de materia orgánica en tres Ferrasols de pendientes en México. *Chilean Journal of agricultural research*, 71(2), 283-292.
- Maycotte, C. C., Martínez, A. V., Hernández, J. V., Santos, A. T., y Vera, G. (2002). Radiación fotosintéticamente activa y propiedades fisico-químicas en suelos forestales con y sin incendio. *Madera y Bosques*, 8(2), 39-55.
- Mayo-Mendoza, M., Romo-Campos, R. D. L., y Medina-Fernández, P. (2018). Tasa relativa de crecimiento de herbáceas con potencial de restauración en suelos degradados del bosque La Primavera, Jalisco, México. *Acta Universitaria*, 28(2), 58-66.
- Medina, B. A. E. (2019). *Sucesiones de vegetación en áreas deforestadas y en proceso de degradación del bosque de protección de Carpish con fines de restauración ecológica* [Tesis de maestría. Escuela de Posgrado. Universidad Nacional Agraria De La Selva].

- Medina, L. R., y Aranda, P. D. (1997). *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fascículo 12. Gymnospermae Lindl.* UNAM. México, D.F.
- Mejía-Canales, A., Franco-Maass, S., Endara Agramont, A. R., y Ávila Akerberg, V. (2018). Caracterización del sotobosque en bosques densos de pino y oyamel en el Nevado de Toluca, México. *Madera y Bosques*, 24(3) 1-15.
- Melo, A. S. (2008). ¿O que ganhamos' confundindo'riqueza de espécies e equabilidade em um índice de diversidade? *Biota Neotropica*. 8(3), 21-27.
- Méndez-Osorio, C. (2018). *Estructura y composición de especies arbóreas en bosques templados de la Sierra Madre del Sur, México* [Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León].
- Méndez Osorio, C., Alanís Rodríguez, E., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, Ó. A., y Treviño Garza, E. J. (2014). Análisis de la regeneración postincendio en un bosque de pino-encino de la Sierra de Guerrero, México. *Ciencia UANL*, 17(69), 63-70.
- Méndez-Osorio, C., Mora Donjuán, C. A., Alanís Rodríguez, E., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, O. A., Treviño Garza, E. J., y Pequeño Ledezma, M. Á. (2018). Fitodiversidad y estructura de un bosque de pino-encino en la Sierra Madre del Sur, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50), 35-53.
- Méndez, L. V., Cruz-Cisneros, R., y Ramírez, M. V. (2000). Presencia de nódulos fijadores de nitrógeno en raíces de *Casuarina* spp. en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 25(88), 93-102.

- Mendoza, C. D., Atencio, C. H., y Sánchez, K. P. (2018). Características físico químicas de suelos con relación a su conformación estructural. *Investigación e innovación en ingenierías*, 6(1), 58-69.
- Michel, H. C., Oliva, F. G., Rodríguez, J. C., y Villegas, A. E. C. (2015). Cambios en el almacenamiento de nitrógeno y agua en el suelo de un matorral desértico transformado a sabana de buffel (*Pennisetum ciliare* (L.) Link). *Terra Latinoamericana*, 33(1), 79-93.
- Mier, L. G. H., y de Pascual, C. C. N. (2020). Características estructurales y demográficas de *Juniperus deppeana* Steud. en dos localidades del estado de Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(61).
- Miranda, L. M., Moya, E. G., Valdéz-Hernández, J. I., y de la Cruz Isidro, V. (2005). Evaluación del sistema agroforestal" árboles en terrenos de cultivo", en Vicente Guerrero, Tlaxcala, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(3), 203-212.
- Mitchell, K. (2010). Quantitative analysis by the point-centered quarter method. arXiv preprint arXiv:1010.3303.
- Molina, L. G., Mireles, M. A., Anzures, F. C., Pérez, A. B., y González, J. M. (2014). Cambios de carbono orgánico del suelo bajo escenarios de cambio de uso de suelo en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(7), 1275-1285.
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., y González-Elizondo, M. D. S. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2).

- Morales, C. A., Ramírez, J. M., y Ramírez-García, E. (2012). Algunas modificaciones físicas y químicas del suelo al establecer una plantación de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* DK Bailey. *Foresta Veracruzana*, 14(1), 29-34.
- Morán, Y., Portillo, M., Burbano, H., Vélez, J., Ruiz, H., y Navia, J. (2012). Efecto de la incorporación de hojarasca de especies arbóreas sobre el CO₂, pH y fósforo en un suelo Vitric haplustand. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 29(2), 16-25.
- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad. Volumen 1*. Manuales y tesis SEA. Zaragoza, España.
- Moreno, C., González, M. I., y Egido, J. A. (2015). Influencia del manejo sobre la calidad del suelo. *Revista Científica Ecuatoriana*, 2(1).
- Moreno-Jiménez, V., Gama-Campillo, L. M., Romero-García, A., Ochoa-Gaona, S., Contreras-Sánchez, W. M., Jiménez-Pérez, N. D. C., y Mata-Zayas, E. E. (2019). Características del paisaje y su relación con la diversidad y estructura de la vegetación ribereña del sureste de México. *Acta Botánica Mexicana*, 126, 1-20.
- Morláns, C., y María, B. (2014). *Introducción a la ecología de poblaciones*. Catamarca, Argentina. Editorial Científica Universitaria. Universidad Nacional de Catamarca.
- Moscatelli, G., Luters, L. A., Gómez, L. A., Magen, H., y Lavado, R. S. (2001). *Niveles de disponibilidad y reservas de potasio en Argentina. El potasio en sistemas agrícolas argentinos*. International Potash Institute–Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires.

- Mostacedo, B., y Fredericksen, T. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR). Santa Cruz, Bolivia.
- Munive-Martínez, C., Vázquez-Cuecuecha, O., Zamora-Campos, E., López-López, A., Calvario-Rivera, C. I. y García-Gallegos, E. (2018). La importancia de rehabilitar tepetate con *Lupinus campestris* Cham. & Schltldl. *Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 6(2), 2097.
- Muñoz-Rojas, J., Morales-García, Y.E., Báez A., y Quintero-Hernández, V. (2016). Métodos económicos para la cuantificación de microorganismos. En: Science Associated Editors (Eds.). *Instituciones de educación superior en México. La labor investigadora e innovadora* (pp. 67-85). ScAesEd. Cheyenne, Estados Unidos.
- Murillo, J., Rodríguez, G., Roncallo, B., Amparo Rojas, L., y Bonilla, R. R. (2014). Efecto de la aplicación de prácticas sostenibles en las características físicas, químicas y microbiológicas de suelos degradados. *Pastos y Forrajes*, 37(3), 270-278.
- Nannipieri, P. A. O. L. O., Grego, S., Ceccanti, B., Bollag, J., y Stotzky, G. (1990). *Ecological significance of the biological activity in soil*. Soil and Biochemistry, 6.
- Navarro-Garza, H., Pérez-Olvera, A., y Flores-Sánchez, D. (2004). Productividad del tepetate con sistemas rotacionales. *Terra Latinoamericana*, 22(1), 71-79.
- Noguera, M. A., y Vélez, J. A. (2011). Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo en diferentes usos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(1), 40-52.

- Núñez E. R. (2007) El suelo como medio natural en la nutrición de los cultivos. En: G.G. Alcántara y L.I. Trejo-Téllez (Eds.). *Nutrición de cultivos* (pp. 94-157). Mundi-Prensa. México.
- Ochoa, V., Hinojosa, B., Gómez-Muñoz, B., y García-Ruiz, R. (2007). Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos. *Iniciación a la Investigación*, 2(1), i-x.
- Odum, E. P. (2014). The strategy of ecosystem development. En: O. N. Forster (Ed.). *The ecological design and planning reader* (pp. 203-216). Island Press, Washington, DC.
- Olvera-Vargas, M., y Figueroa-Rangel, B. L. (2012). Caracterización estructural de bosques montanos dominados por encino en el centro-occidente de México. *Revista Ecosistemas*, 21(1-2).
- Ortiz-Solorio, C. A. (2019). *Edafología*. Trillas. Ciudad de México, México. ISBN: 978-607-17-3577-5.
- Ortiz-Torres, C., Gómez-Díaz, J. D., Domínguez-Álvarez, F. A., y Villanueva-Morales, A. (2018). Influencia de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y *Opuntia ficus-indica* L. Mill en las propiedades físicas y químicas del suelo. *Terra Latinoamericana*, 36(3), 275-285.
- Osman, K. T. (2014). *Soil degradation, conservation and remediation*. Springer. Netherlands.
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 1-4.

- Otero, L., Sastriquez, F. O., y Morales, M. (1998). Participación de la arcilla y la materia orgánica en la capacidad de intercambio catiónico de vertisoles de la provincia Granma. *Terra Latinoamericana*, 16(3), 189-194.
- Oyarzún, A., Donoso, P. J., y Gutiérrez, Á. G. (2019). Patrones de distribución de alturas de bosques antiguos siempreverde del centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 40(3), 355-364.
- Padilla, V. J. A., Martínez, E. E., Ortega-Rubio, A., Miranda, R. P., y Hernández, A. R. G. (2014). Deterioro en áreas naturales protegidas del centro de México y del Eje Neovolcánico Transversal. *Investigación y Ciencia*, 22(60), 37-49.
- Pajares, S., Ferrera-Cerrato, R., y Gallardo, J. F. (2006). Influencia de la degradación de los suelos volcánicos mejicanos en la población microbiana. En: J. F. Gallardo. (Ed.). *Medioambiente en Iberoamérica: visión desde la física y la química en los albores del siglo XXI* (pp. 341-350). Diputación Provincial de Badajoz. Badajoz, España.
- Pajares-Moreno, S., Gallardo-Lancho, J. F., Marinari, S., y Etchevers-Barra, J. D. (2010a). Indicadores bioquímicos de calidad en tepetates cultivados del Eje Neovolcánico mexicano. *Agrociencia*, 44(2), 121-134.
- Pajares-Moreno, S., Gallardo-Lancho, J. F., y Etchevers-Barra, J. D. (2010b). Indicadores bioquímicos en suelos de un transecto altitudinal en el eje Neovolcánico mexicano. *Agrociencia*, 44(3), 261-274.
- Paradelo, R., y Barral, M. T. (2009). Effect of moisture and disaggregation on the microbial activity of soil. *Soil and Tillage Research*, 104(2), 317-319.

- Pedraza, A. F. G., y Dezzeeo, N. (2011). Efecto del cambio de bosque a pastizal sobre las características de algunos suelos en los llanos occidentales de Venezuela. *Interciencia*, 36 (2), 135-141.
- Pérez, A., Céspedes, C., Almonte, I., Sotomayor Ramírez, D., Cruz, C. E., y Núñez, P. A. (2012). Evaluación de la calidad del suelo explotado para la minería después de diferentes sistemas de manejo. *Terra Latinoamericana*, 30(3), 201-211.
- Phillips, J. (1934). Succession, Development, the Climax, and the Complex Organism: An Analysis of Concepts. Part I. *Journal of Ecology*, 22(2), 554-571.
- Pickering, L. J. M. (2013). *Memoria documental del componente Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua (COUSSA) 2008-2012*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. México, D.F. (En línea) <https://www.agricultura.gob.mx/sites/default/files/sagarpa/document/2018/11/14/1530/14112018-programa-de-sustentabilidad-de-los-recursos-naturales-coussa-int.pdf>
- Pineda, M. E. B., y Lizarazo-Forero, L. M. (2013). Grupos funcionales de microorganismos en suelos de páramo perturbados por incendios forestales. *Revista de Ciencias*, 17(2), 121-136.
- Pla, L. (2006). Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia*, 31(8), 583-590.
- Porta-Casanellas, J., y López-Acevedo, R. M. (2008). Introducción a la Edafología uso y protección del suelo. Mundi-Prensa. Madrid, España.

- Porta-Casanellas, J. López-Acevedo, R. M. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Prat, C., Ch, V. O., y Rugama, J. A. (2003). Impacto de la roturación y del manejo agronómico de un tepetate sobre su estructura. *Terra Latinoamericana*, 21(1), 109-115.
- PRONATURA. (2015). *Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua, Informe Anual 2015*. PRONATURA. México, D.F.
- Quantin, P., Prat, C., y Zebrowski, C. (1993). Erosion et restauration des sols volcaniques indurés «Tepetates» de la région de Mexico et de Tlaxcala, Mexique. *Cah Orstom, Ser Pedofil*, 28, 175-86.
- Quintero-Gradilla, S. D., Jardel-Peláez, E. J., Cuevas-Guzmán, R., García-Oliva, F., y Martínez-Yrizar, A. (2019). Cambio postincendio en la estructura y composición del estrato arbóreo y carga de combustibles en un bosque de *Pinus douglasiana* de México. *Madera y Bosques*, 25(3).
- Ramírez, N., Ochoa, S., González, M., y Quintana, P. F. (1998). Análisis florístico y sucesional en la estación biológica Cerro Huitepec, Chiapas, México. *Acta Botánica Mexicana*, (44), 59-85.
- Ramírez-Herrera, C., Vargas-Hernández, J. J., y López-Upton, J. (2005). Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. *Acta Botánica Mexicana*, (72), 1-16.
- Ramos, M. M., y Orth, X. G. (2007). Sucesión ecológica y restauración de las selvas húmedas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (80), 69-84.
- Richardson, D. M. (1998). Forestry trees as invasive aliens. *Conservation Biology*, 12(1), 18-26.

- Rincón, L. E. C., y Gutiérrez, F. A. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.
- Ríos, H., y Vargas, O. (2003). Ecología de las especies invasoras. *Pérez Arbelaezia*, 14, 119-148.
- Ríos, O. V. (2011). Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. *Acta biológica colombiana*, 16(2), 221-246.
- Rodríguez, B.C., Sevillano G. F., y Subramaniam, P. (1985). *La fijación de nitrógeno atmosférico. Una biotecnología en la producción agraria*. CSIC-Centro de Edafología y Biología Aplicada. Salamanca.
- Rodríguez-Tapia, S., Ortiz-Solorio, C. A., Hidalgo-Moreno, C., y del Carmen Gutiérrez-Castorena, M. (2004). Los tepetates de la ladera oeste del cerro Tláloc: saprolita, sin endurecimiento pedológico. *Terra Latinoamericana*, 22(1), 11-21.
- Rojas-García, F., y Villers-Ruiz, L. (2008). Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 33(104), 59-86.
- Romero, M. P., Santamaría, D. M., y Zafra, C. A. (2009). Bioingeniería y suelo: abundancia microbiológica, pH y conductividad eléctrica bajo tres estratos de erosión. *Umbral Científico*, (15), 67-74.
- Rosero, J., Vélez, J., Burbano, H., y Ordóñez, H. (2019). Cuantificación de la respiración y biomasa microbiana en Andisoles del sur de Colombia. *Agro Sur*, 47(3), 15-25.
- Ruacho-González, L., González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., y López-González, C. (2013). Diversidad florística en cimas de la Sierra Madre

- Occidental, México, y su relación con variables ambientales. *Botanical Sciences*, 91(2), 193-205.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., y Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México. 1a. Edición digital*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Rzedowski, J., y de Rzedowski, G. C. (1990). Nota sobre el elemento africano en la flora adventicia de México. *Acta Botánica Mexicana*, (12), 21-24.
- Saavedra-Romero, L. D. L., Hernández-de la Rosa, P., Alvarado-Rosales, D., Martínez-Trinidad, T., y Villa-Castillo, J. (2019). Diversidad, estructura arbórea e índice de valor de importancia en un bosque urbano de la Ciudad de México. *Polibotánica*, (47), 25-37.
- Salmerón, L. A., Geada, L. G., y Fagilde, E. M. D. C. (2017). Propuesta de un índice de diversidad funcional: Aplicación a un bosque semideciduo micrófilo de Cuba Oriental. *Bosque (Valdivia)*, 38(3), 457-466.
- Salmeron, R. F. J. (2019). *Efecto de la especie de árbol sobre la composición de herbáceas del sotobosque del bosque tropical caducifolio de Tepoztlán, Morelos* [Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación. Universidad Autónoma del Estado de Morelos].
- Sánchez, A., y López, L. (2003). Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 74(1), 47-71.

- Sánchez, M. E. G., Borja, M. E. L., Álvarez, P. A. P., Romero, J. G., Cozar, J. S., Navarro, D. M., y de las Heras Ibáñez, J. (2019). Efecto de los trabajos de restauración forestal en ladera después de incendio sobre la recuperación de la vegetación. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (45), 25-34.
- Sánchez, M. E. G., Borja, M. E. L., Álvarez, P. A. P., Romero, J. G., Sagra, J., Navarro, D. M., y de las Heras Ibáñez, J. (2019). Efecto de los trabajos de restauración forestal en ladera después de incendio sobre la recuperación de la vegetación. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (45), 25-34.
- Sánchez, O. S., Islebe, G. A., y Hernández, M. V. (2007). Flora arbórea y caracterización de gremios ecológicos en distintos estados sucesionales de la selva mediana de Quintana Roo. *Foresta Veracruzana*, 9(2), 17-26.
- Santos, P. E., Roa, H. A., Darghan, A. E., y Monroy, J. C. (2018). Modelado espacial del carbono orgánico del suelo y su relación con otras propiedades químicas en el cultivo de arroz del distrito de riego del Norte de Santander Colombiano. *Gestión y Ambiente*, 21(2), 252-262.
- Sariñana, F. R. (1999). *Análisis de la fitodiversidad del estrato fisonómicamente dominante en 15 tipos de vegetación en Nuevo León, México* [Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León].
- Secretaría de Agricultura y Ganadería. (1963). *Plan Tlaxcala para el combate de la erosión*. Boletín de Divulgación, Secretaría de Agricultura y Ganadería, Dirección General de Conservación de Suelo y Agua. México D.F.

- Singh, K. D., Arifin, A., Radziah, O., Shamshuddin, J., Hazandy, A. H., Majid, N. M., Aiza-Shaliha, J., Rui, T. X., y Keeren, S. R. (2013). Status of soil microbial population, enzymatic activity and biomass of selected natural, secondary and rehabilitated forests. *American Journal of Environmental Sciences*, 9(4), 301-309.
- Soejima, A., Tanabe, A. S., Takayama, I., Kawahara, T., Watanabe, K., Nakazawa, M., Mishima, M., y Yahara, T. (2017). Phylogeny and biogeography of the genus *Stevia* (Asteraceae: Eupatorieae): an example of diversification in the Asteraceae in the new world. *Journal of Plant Research*, 130(6), 953-972.
- Soil Survey staff. (1994). *Keys to Soil Taxonomy*. 6th ed. USDA-SCS. Washington, D.C.
- Soil Survey Staff. (1998). *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2th ed. USDA-SCS. Washington, D.C.
- Solís, J. D. Á., Ferrera, C., R., y Etchevers, B. J. D. (2000). Actividad microbiana en tepetate con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia*, 34(5), 523-532.
- Soriano-Soto, M. (2018). *Conductividad eléctrica del suelo*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Soto-Mora, E. S., Hernández-Vázquez, M., Luna-Zendejas, H. S., Ortiz-Ortiz, E., y García-Gallegos, E. (2016). Evaluación del contenido de materia orgánica en suelos agrícolas y su relación carbono/nitrógeno. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 3(5), 98-105.
- Suárez G. A. I., y Equihua, M. (2009). Rehabilitación de algunas propiedades químicas de los suelos y del bosque de niebla en Veracruz, México con

- ensambles experimentales de leñosas nativas y *Casuarina equisetifolia* L, Amoen. *Interciencia*, 34(7), 471-478.
- Tang, J., Mo, Y., Zhang, J., y Zhang, R. (2011). Influence of biological aggregating agents associated with microbial population on soil aggregate stability. *Applied Soil Ecology*, 47(3), 153-159.
- Tapia, S. R., Gutiérrez, C. del C., Hidalgo, M. C., y Ortiz, S. C. A. (1999). Intemperismo en Tepetates y en cenizas volcánicas y su influencia en la formación de Andisoles. *Terra Latinoamericana*, 17(2), 97-108.
- Torres, D., Rodríguez, N., Yendis, H., Florentino, A., y Zamora, F. (2006). Cambios en algunas propiedades químicas del suelo según el uso de la tierra en el sector el Cebollal, Estado Falcon, Venezuela. *Bioagro*, 18(2), 123-128.
- Torrez, V., Jørgensen, P. M., y Macía, M. J. (2010). La diversidad alfa y beta en relación a variables abióticas en un bosque seco. *Análisis de Dinámicas Ecológicas y de Paisajes*, 30, 217-234.
- Tortora, G. J., Funke, B. R., y Case, C. L. (2007). *Introducción a la microbiología* 9ª. ed. Editorial Médica Panamericana. Buenos Aires.
- Travieso-Bello, A. C., Gómez, R., y Moreno-Casasola, P. (2006). Los cultivos, los pastizales y los acahuales. En: P. Moreno-Casasola. (Ed.). *Entornos veracruzanos: la costa de La Mancha* (pp. 261-272). Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, México.
- Trevors, J. T. (1984). Effect of substrate concentration, inorganic nitrogen, O₂ concentration, temperature and pH on dehydrogenase activity in soil. *Plant and Soil*, 77(2-3), 285-293.

- Trinidad-Santos, A., y Velasco-Velasco, J. (2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroproductividad*, 9(8), 52-59.
- Vargas, O. (2011). *Los pasos fundamentales en la restauración ecológica*. Memorias del I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Bogotá, Colombia.
- Vargas-Ríos, O. (1997). Un modelo de sucesión-regeneración de los páramos después de quemas. *Caldasia*, 331-345.
- Vargas-Tapia, P., Castellanos-Ramos, J. Z., Muñoz-Ramos, J. D. J., Sánchez-García, P., Tijerina-Chávez, L., López-Romero, R. M., Martínez-Sánchez, C., y Ojodeagua-Arredondo, J. L. (2008). Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México. *Agricultura técnica en México*, 34(3), 323-331.
- Vázquez-Alvarado, R., Blanco-Macías, F., Ojeda-Zacarías, M., Martínez-López, J., Valdez-Cepeda, R., Santos-Haliscak, A., y Háuad-Marroquín, L. (2011). Reforestación a base de nopal y maguey para la conservación de suelo y agua. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 5 (edición especial), 185-203.
- Vázquez-Cuecuecha, O. G., Zamora-Campos, E. M., García-Gallegos, E., y Ramírez-Flores, J. A. (2015). Densidad básica de la madera de dos pinos y su relación con propiedades edáficas. *Madera y Bosques* 21(1), 129-138.
- Vázquez-Yanes, C., Batis-Muñoz, A. I., Alcocer-Silva, M. I., Gual-Díaz, M., & Sánchez-Dirzo, C. (1999). Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. *Reporte técnico del proyecto J*, 84, 201-204.

- Velázquez-Rodríguez, A. S., Flores-Román, D., y Acevedo-Sandoval, O. A. (2001). Formación de agregados en tepetate por influencia de especies vegetales. *Agrociencia*, 35(3), 311-320.
- Ventura-Ríos, A., Plascencia-Escalante, F. O., Hernández de la Rosa, P., Ángeles-Pérez, G., y Aldrete, A. (2017). ¿Es la reforestación una estrategia para la rehabilitación de bosques de pino?: Una experiencia en el centro de México. *Bosque (Valdivia)*, 38(1), 55-66.
- Vergara-Sánchez, M. Á., Etchevers-Barra, J. D., y Vargas-Hernández, M. (2004). Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 359-367.
- Vilà, M. (1998). Efectos de la diversidad de especies en el funcionamiento de los ecosistemas. *Orsis: organismes i sistemes*, 105-117.
- Viñales, A. M., y Sánchez, N. B. (2003). Flora asociada a un sitio minado recultivado con sustitución de especies. *Centro Agrícola*, 30(1), 84-89.
- Von Mersi, W., y Schinner, F. (1991). An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with iodonitrotetrazolium chloride. *Biology and fertility of soils*, 11(3), 216-220.
- Watanabe, K., Yahara, T., Soejima, A., y Ito, M. (2001). Mexican species of the genus *Stevia* (Eupatorieae, Asteraceae): Chromosome numbers and geographical distribution. *Plant Species Biology*, 16(1), 49-68.
- Welemariam, M., Kebede, F., Bedadi, B., y Birhane, E. (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), 12.
- Yáñez-Díaz, M. I., Cantú Silva, I., González Rodríguez, H., Marmolejo Monsiváis, J. G., Jurado, E., y Gómez Meza, M. V. (2017). Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 8(42), 123-149.
- Zagal, E., Rodríguez, N., Vidal, I., y Quezada, L. (2002). Actividad microbiana en un suelo de origen volcánico bajo distinto manejo agronómico. *Agricultura Técnica*, 62(2): 297-309.
- Zamudio, S., y Carranza, E. (1994). *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Fascículo 29. Cupressaceae*. Instituto de Ecología A.C.
- Zimmermann, T. G. (2016). *Potencial de Invasão das Restingas por Casuarina equisetifolia L.: Fatores que Limitam a Regeneração da Vegetação* [Tesis de Doctorado. Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Escola Nacional de Botânica Tropical].