



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES Y DEL AMBIENTE

CALIDAD EDÁFICA Y DIVERSIDAD VEGETAL EN UN RELICTO DE BOSQUE, SUELO DEGRADADO Y EN REHABILITACIÓN EN TLAXCALA, MÉXICO

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES Y DEL AMBIENTE

Presenta:

ANA ROSARIO VELASCO SÁNCHEZ

Bajo la supervisión de: ELIZABETH HERNÁNDEZ ACOSTA, DRA.



**Maestría en Ciencias en
Ciencias Forestales
y del Ambiente**
Universidad Autónoma Chapingo
División de Ciencias Forestales



Chapingo, Estado de México, febrero de 2026



CALIDAD EDÁFICA Y DIVERSIDAD VEGETAL EN UN RELICTO DE BOSQUE, SUELO DEGRADADO Y EN REHABILITACIÓN EN TLAXCALA, MÉXICO

Tesis realizada por **Ana Rosario Velasco Sánchez** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES Y DEL AMBIENTE

DIRECTORA:



DRA. ELIZABETH HERNÁNDEZ ACOSTA

CODIRECTORA:



DRA. ELIZABETH GARCÍA GALLEGOS

ASESOR:



DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO

Declaración de uso de Inteligencia Artificial

Durante la preparación y escritura de la presente tesis la autora ANA ROSARIO VELASCO SÁNCHEZ reconoce el uso de la herramienta o servicio de Inteligencia Artificial nombrado CHATGPT para gestión de funciones como síntesis y corrección de estilo. La autora revisó y editó el contenido generado según sus necesidades y adquiere la responsabilidad completa por el contenido de la información presentada en la tesis.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	VII
AGRADECIMIENTOS	VIII
DATOS BIOGRÁFICOS	IX
RESUMEN GENERAL	X
GENERAL ABSTRACT	XI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Justificación	5
1.3. Hipótesis	6
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivo general.....	6
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. Literatura citada	7
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	11
2.1. El suelo	11
2.1. Calidad edáfica	11
2.2. Propiedades del suelo	12
2.3.1 Propiedades físicas.....	12
2.3.2 Propiedades químicas	14
2.3.3 Propiedad biológica	17
2.3. Degradación de suelos	18
2.4. Tepetate.....	19
2.5. Rehabilitación de suelos	20
2.6.1 Obras de conservación y rehabilitación de suelos.....	20
2.6. Relicto de bosque	22
2.7. Diversidad vegetal	22

2.8.1 Estrato arbustivo	23
2.8.2 Estrato herbáceo	23
2.8. Índices de vegetación	24
2.9.1 Riqueza de especies.....	24
2.9.2 Diversidad de especies.....	24
2.9. Relación suelo-agua-planta	27
2.10. Análisis de componentes principales	28
2.11. Literatura citada	28
CAPÍTULO 3. CALIDAD EDÁFICA Y REHABILITACIÓN DE TEPETATES CON ZANJAS BORDO EN TLAXCALA, MÉXICO	35
CAPÍTULO 4. DIVERSIDAD VEGETAL EN ZANJAS-BORDO Y RELICTO DE BOSQUE BAJO CONDICIONES ESTACIONALES EN TLAXCALA, MÉXICO ..	52
CAPÍTULO 5. CALIDAD EDÁFICA Y DIVERSIDAD VEGETAL EN SUELO REHABILITADO, TEPETATE Y RELICTO DE BOSQUE BAJO ESTACIONALIDAD CLIMÁTICA.....	80
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES	98

LISTA DE CUADROS CAPÍTULO 3

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas en los tres sitios bajo estudio en el periodo de lluvia y seca.....	41
Cuadro 2. Valores de medianas de la respiración microbiana en los tres sitios bajo estudio por periodo.....	43
Cuadro 3. Proporción de la variación explicada por cada componente principal. .	43

LISTA DE CUADROS CAPÍTULO 4

Cuadro 1. Familia, género y número de especies vegetales en las zanjas-bordo y el relicto de bosque en temporada de lluvia y seca.....	65
Cuadro 2. Familia y nombre científico de las especies vegetales encontradas en las zanjas-bordo y el relicto de bosque por temporada.....	66
Cuadro 3. Índices de diversidad vegetal en suelo relicto de bosque y zanjas-bordo en periodo de lluvia y seca.....	69
Cuadro 4. Coeficiente de similitud de Sørensen entre las zanjas-bordo y el relicto de bosque en temporada de lluvia y seca.....	71

LISTA DE CUADROS CAPÍTULO 5

Cuadro 1. Proporción de la variación explicada por cada componente principal. .	89
Cuadro 2. Cargas de las variables de suelo y diversidad vegetal en los tres primeros componentes principales.....	90

LISTA DE FIGURAS DEL CAPÍTULO 3

Figura 1. Localización de los sitios de muestreo dentro del cerro de San Gregorio, comunidad de San Diego Metepec, Tlaxcala..	39
---	----

LISTA DE FIGURAS DEL CAPÍTULO 4

Figura 1. Ubicación de las zanjas-bordo y relicto de bosque.	55
Figura 2. Zanjas-bordo (a y b) y relicto de bosque (c y d) en temporada de lluvia (agosto de 2024).	57
Figura 3. Zanjas-bordo (a y b) y relicto de bosque (c y d) en temporada seca (febrero de 2025).	57
Figura 4. Riqueza de especies en las zanjas-bordo y relicto de bosque en temporada de lluvia y seca en el área de estudio..	61
Figura 5. Abundancia relativa de individuos en las zanjas-bordo y relicto de bosque en temporada de lluvia y seca en el área de estudio..	63

LISTA DE FIGURAS DEL CAPÍTULO 5

Figura 1. Localización de los tres sitios de estudio: suelo en rehabilitación (zanjas-bordo), tepetate (suelo degradado) y el suelo relicto de bosque en San Diego Metepec, Tlaxcala. Fuente: elaboración propia con información de INEGI.	84
---	----

DEDICATORIA

A mis padres por confiar en mí y ser mi apoyo y fortaleza para continuar con mi desarrollo académico y profesional.

A mis hermanos por motivarme en los momentos más difíciles, en especial a Maricela, quien ha sido mi sostén en la vida, gracias por tu compañía constante.

A mis sobrinos, cuya motivación y fe en mí me impulsan a continuar.

Gracias a quienes estuvieron presentes, ofreciendo su fuerza y su ánimo, y haciéndome sentir acompañada en este camino.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, mi alma mater, por contribuir y darme la oportunidad de continuar con mi formación académica.

Agradezco infinitamente a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), cuyo respaldo mediante becas permitió que pudiera continuar con mis estudios y llevar a cabo esta investigación

A la División de Ciencias Forestales y al posgrado de Ciencias Forestales y del Ambiente, por el apoyo constante del personal académico y administrativo.

A mi comité asesor, la Dra. Elizabeth Hernández Acosta (directora de tesis); Dra. Elizabeth García Gallegos (codirectora) y al Dr. David Cristóbal Acevedo (asesor). Por su orientación, paciencia y apoyo, además de compartir su tiempo y conocimientos.

A la asociación civil Tlalli Atoktli de la comunidad de San Diego Metepec, Tlaxcala por su apoyo para llevar a cabo esta investigación

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Ana Rosario Velasco Sánchez

Fecha de nacimiento: 07 de octubre de 1993

Lugar de nacimiento: Chiapas

CURP: VESA931007MCSLNN02

Profesión: Ingeniera en Recursos Naturales Renovables

Cédula profesional: 13587092



Desarrollo académico

Bachillerato: Preparatoria agrícola, Universidad Autónoma Chapingo

Licenciatura: Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

CALIDAD EDÁFICA Y DIVERSIDAD VEGETAL EN UN RELICTO DE BOSQUE, SUELO DEGRADADO Y EN REHABILITACIÓN EN TLAXCALA, MÉXICO

En el estado de Tlaxcala, la degradación del suelo es un problema ambiental crítico, principalmente en sitios de tepetate, donde se han perdido funciones edáficas y ecológicas. Ante esta situación, las zanjas-bordo se han implementado como una estrategia de rehabilitación para mejorar la calidad edáfica y favorecer la recuperación de la vegetación. El objetivo del presente estudio fue evaluar la calidad edáfica y la diversidad de especies vegetales en un suelo de relictos de bosque, degradado con zanja-bordo y de tepetate mediante el análisis de sus propiedades físicas, químicas y biológica, para determinar su impacto en la rehabilitación del área con antigua vocación forestal.

Se realizaron muestreos de suelo y vegetación en temporadas de lluvia y seca. Se analizaron propiedades físicas, químicas y biológica del suelo, así como los índices de diversidad de Shannon-Wiener, Simpson y el coeficiente de similitud de Sørensen. Los datos se analizaron en InfoStat 2020 mediante pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk, ANOVA, prueba de medias Tukey, Kruskal-Wallis y análisis de componentes principales, para identificar atributos asociados a la rehabilitación.

Los resultados mostraron que las zanjas-bordo presentan mejoras significativas en el contenido de arcilla, pH, conductividad eléctrica y nitrógeno inorgánico, comparado con el tepetate sin rehabilitación. Se identificó a la densidad aparente, contenido de arcilla, materia orgánica, calcio y capacidad de intercambio catiónico como variables clave para el monitoreo del avance en la rehabilitación.

Las zanjas-bordo registraron mayor diversidad que el relictos de bosque durante la temporada de lluvia, mientras que en seca ambos sitios presentaron valores intermedios sin diferencias significativas. El relictos de bosque mostró menor variabilidad estacional, reflejando mayor resiliencia. Las zanjas-bordo se encuentran en una etapa intermedia de recuperación funcional, lo que confirma su efectividad como estrategia de rehabilitación, sin que se aproxime a las condiciones del relictos de bosque.

Palabras clave: índice de vegetación, propiedades físicas, químicas y biológica, tepetate, zanjas-bordo

Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales y del Ambiente, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Ana Rosario Velasco Sánchez

Director de Tesis: Dra. Elizabeth Hernández Acosta

GENERAL ABSTRACT

SOIL QUALITY AND PLANT DIVERSITY IN A FOREST REMNANT, DEGRADED SOILS AND REHABILITATION AREAS IN TLAXCALA, MEXICO

In the state of Tlaxcala, soil degradation is a critical environmental issue, particularly in tepetate areas, where essential edaphic and ecological functions have been lost. Given this situation, ditches have been implemented as a rehabilitation strategy to improve soil quality and promote vegetation recovery. The objective of this study was to evaluate soil quality and plant species diversity in a remnant forest soil degraded with ditches and tepetate, by analyzing its physical, chemical, and biological properties to determine their impact on the rehabilitation of the area with former forest use. Soil and vegetation samples were collected during both the rainy and dry seasons.

The physical, chemical, and biological properties of the soil were analyzed, along with the Shannon-Wiener and Simpson diversity indices and the Sørensen similarity coefficient. The data were analyzed in InfoStat 2020 using Shapiro-Wilk normality tests, ANOVA, Tukey's mean test, Kruskal-Wallis, and principal component analysis to identify the attributes associated with rehabilitation.

The results showed that the ditch areas showed significant improvements in clay content, pH, electrical conductivity, and inorganic nitrogen compared to the unrehabilitated tepetate. Bulk density, clay content, organic matter, calcium, and cation exchange capacity were identified as key variables for monitoring rehabilitation progress. The ditches exhibited greater diversity than the forest remnant during the rainy season, whereas in the dry season both sites presented intermediate values without significant differences.

The forest remnant exhibited lower seasonal variability, reflecting greater resilience. The ditches are in an intermediate stage of functional recovery, confirming their effectiveness as a rehabilitation strategy, although they have not yet reached the conditions observed in the forest remnant.

Key words: vegetation index, physical, chemical, and biological properties, tepetate, ditches

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Evaluar la calidad edáfica y la diversidad vegetal en suelos degradados es fundamental para obtener un diagnóstico preciso del grado de degradación y sus impactos en funciones ecológicas y productivas, con la finalidad de proponer acciones de manejo y restauración efectivas (Song et al., 2025).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2023) define a la calidad edáfica como la capacidad de sostener funciones ecológicas fundamentales como la conservación de la biodiversidad y la regulación del ciclo hidrológico. Influye directamente en procesos biológicos y bioquímicos claves relacionados con el reciclaje de nutrientes (Echeverría-Pérez et al., 2023). Además, constituye un ecosistema altamente diverso, en el que la interacción entre sus características físicas, químicas y biológicas resulta indispensable para preservar su calidad y mantener la capacidad productiva de los sistemas forestales (Susyan et al., 2011; Villar et al., 2004).

La diversidad vegetal también es fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas forestales y en la provisión de servicios ecosistémicos (Maclaurin & Sterelny, 2008). Los sitios con mayor diversidad son más resistentes a perturbaciones y tienen un mejor funcionamiento, y más servicios ecosistémicos, en comparación con comunidades con menos especies (Brockhoff et al., 2017). Específicamente la diversidad vegetal evita la pérdida del suelo por erosión hídrica y eólica. Además, las raíces absorben la humedad del suelo y ayudan a profundizar los niveles freáticos (Torres-Guerrero et al., 2013) también, influyen en la diversidad, estructura y composición de las comunidades de microorganismos y la estabilidad estructural del suelo (Lange et al., 2015; Shen et al., 2022).

La permanencia de la calidad edáfica y de la diversidad vegetal se ven afectadas constantemente por actividades antropogénicas: prácticas inadecuadas de producción, deforestación, sobrepastoreo, cambios de uso de suelo, políticas ambientales y públicas deficientes, y el cambio climático (Secretaría de Medio

Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2018) a pesar de su importancia ecológica y funcionalidad ecosistémica.

Como consecuencia, la pérdida de funcionalidad se manifiesta principalmente en la disminución de la capacidad productiva del suelo, derivada del deterioro de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo cual está estrechamente relacionado con la pérdida y fragmentación de los bosques originales (de Sosa et al., 2024) dejando relictos de bosque (Jaroszewicz et al., 2019). Un ejemplo representativo de la pérdida de la funcionalidad es el tepetate, un material geológico endurecido que limita el desarrollo de la vegetación y dificultan su uso (Gama-Castro et al., 2007), así mismo disminuye la capacidad de proveer servicios ambientales.

Sin embargo, la implementación de obras de conservación de suelos, como terrazas, zanjas de infiltración y barreras vivas, ha demostrado ser una estrategia eficaz para mitigar estos problemas, ya que contribuyen a la rehabilitación de los suelos mejorando su estructura y aumentando su productividad (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2023) reduciendo la velocidad del escurrimiento, aumenta la infiltración y disminuye la erosión hídrica, que es uno de los principales factores que afectan al tepetate. Las zanjas bordo y la presencia de vegetación nativa influyen de forma positiva en la rehabilitación de este tipo de sustrato al mejorar la calidad de suelos degradados, algunas propiedades químicas y físicas como la capacidad de intercambio catiónico (CIC), calcio, pH, nitrógeno total y la proporción de arcilla y arena (García Gallegos et al., 2023).

Las zanjas bordo favorecen el establecimiento de la diversidad vegetal, sin embargo, provocan modificaciones en la composición de las especies vegetales, vinculadas a la aparición de plantas con escaso valor forrajero, aunque contribuyen a la fijación y protección de los bordes (Reyes Carrillo et al., 2019). Los pastos y herbáceas se establecen inicialmente en sitios con obras de conservación, derivado del incremento en la humedad del suelo, además hay acumulación de materia orgánica mediante la incorporación de la hojarasca y el sistema radicular de estas especies (Doria Treviño et al., 2021). Además, se fomenta la restauración de su

capacidad productiva mediante la introducción de materia orgánica, lo que disminuye la compactación y mejorar la permeabilidad del suelo (Kooch et al., 2024). La relación suelo-planta es fundamental en los ecosistemas para el manejo sostenible de los recursos naturales.

1.1. Antecedentes

La degradación del suelo es uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial, debido a su impacto en los ecosistemas, la regulación hidrológica y el mantenimiento de la biodiversidad (Gardi et al., 2014). En regiones, como Tlaxcala que se encuentra con una amplia superficie con procesos intensos de erosión y perturbación antrópica, la pérdida de la calidad física y química del suelo limita la capacidad de recuperación natural de sus ecosistemas (Semarnat y CP, 2003). Se han generado diversas investigaciones con la finalidad de evaluar el impacto en la rehabilitación de estos suelos, como a continuación se muestra.

Prat et al., (2003) investigaron los efectos de la roturación y las practicas agronómicas sobre la estructura de un tepetate. El experimento analizó las propiedades de un tepetate recién roturado, para ello se utilizaron diferentes tratamientos: roturación a distintas profundidades y aplicación de estiércol. Los resultados indicaron que la roturación redujo la densidad aparente del suelo de 1.5 g/cm³ a 1.07 - 1.17 g/cm³ y aumentó la porosidad de 44 a 54-57%; mientras que, la producción de CO₂ indicó un incremento en la actividad biológica de 200 mg/kg a 600-1200 mg/kg aproximadamente. Por lo cual concluyeron que la roturación y el manejo agrícola adecuados pueden mejorar significativamente la estructura del tepetate, haciéndolo más adecuado para la agricultura.

En suelos degradados, Romero-Barrios et al. (2015) determinaron el contenido de materia orgánica y la densidad aparente como indicadores de degradación en suelos forestales del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. Reportaron un pH moderadamente ácido de 5.5 a 6.2, textura franco-arenosa, una densidad aparente de 1.5 g/cm³ y un contenido de materia orgánica de bajo a muy bajo (4.3 a 0.6 %) por lo que concluyeron que existe una correlación negativa entre la densidad

aparente y la materia orgánica, indicando problemas de degradación del suelo forestal, por lo que sugieren que estos son dos indicadores útiles para evaluar la calidad de los suelos forestales.

De forma general, Cotler et al. (2015) realizaron la evaluación de prácticas de conservación en suelos forestales con zanjas trincheras, el estudio se realizó en 28 sitios distribuidos en siete estados (Baja California Sur, Guanajuato, Hidalgo, Querétaro, Michoacán, Tlaxcala y Veracruz). Los resultados indicaron que la construcción de estas zanjas tiene impactos negativos debido a la remoción del suelo y a la exposición del carbono orgánico, ya que no mejoran las condiciones de retención de humedad necesarias para la reforestación. Las condiciones recomendadas para su construcción incluyen un clima árido o semiárido, pendientes moderadas, suelos poco profundos y con poca vegetación.

Por su parte, García Gallegos et al. (2023) evaluaron el efecto de dos tipos de obras de conservación de suelos: las zanjas bordo y las zanjas trincheras en las localidades de Gustavo Díaz Ordaz, San Bartolomé Matlalohcan y Zacapexco, Tlaxcala. En Gustavo Díaz Ordaz, después de ocho años no se observaron diferencias significativas en las propiedades del suelo en comparación con el área control; en Zacapexco, se observó un impacto positivo en varias propiedades químicas y biológicas del suelo después de cinco años de construir las zanjas bordo, se disminuyó el pH de 8.24 a 7.55, hubo un incremento en la MO de 1.61 a 3.94% y de CO de 0.9 a 2.28%, la CIC fue de 27.45 a 30.58 $\text{Cmol}(+) \text{kg}^{-1}$, calcio de 5.6 a 8.8 $\text{Cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ y magnesio de 1.8 a 2.8 $\text{Cmol}(+) \text{kg}^{-1}$, así como incremento en la actividad biológica; sin embargo, en San Bartolomé Matlalohcan, a 40 años del establecimiento de las zanjas bordo, no se detectaron cambios significativos en las propiedades biológicas del suelo. A través del análisis de componentes principales encontraron que la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el calcio, el pH, el nitrógeno total y la proporción de arcilla y arena son factores que influyen de manera significativa en la calidad del suelo. Por ello, es importante el monitoreo continuo de estas variables para evaluar de forma precisa el impacto de las obras de conservación a lo largo del tiempo.

En cuanto a los análisis de diversidad vegetal, Martínez-y-Pérez et al. (2011) realizaron un análisis florístico en tepetates del estado de Tlaxcala en las localidades Atlangatepec y Altzayanca, en el cual encontraron una diversidad de especies constituida por 44 familias, 106 géneros y 140 especies de plantas vasculares, lo que representa más del 10% de la flora conocida para el estado. El análisis encontró diferencias significativas en la diversidad de especies entre dos localidades estudiadas y entre parcelas experimentales con y sin barreras para retención de sedimentos. Las familias Asteraceae y Poaceae son comunes en ambas localidades, lo que sugiere su adaptabilidad a ambientes deteriorados. Por otra parte, se reportó por primera vez para Tlaxcala la especie *Coryphanta bussleri*, añadiendo una nueva población a la flora de México.

Por otro lado, Condori-Castillo (2012) estimó la diversidad florística y su distribución en sitios fragmentados por actividades agrícolas. Se observaron solo 20 especies en la zona fragmentada, lo que indica una disminución en la diversidad de la flora vegetal. Por otro parte, Rendón-Pérez et al. (2021) determinó la composición de especies en un bosque templado y su relación por el efecto de las prácticas silvícolas, se encontraron en total 88 especies pertenecientes a 47 géneros y 29 familias, en el estrato arbustivo se registraron 6 familias y *Baccharis conferta* Kunth y *Ageratina glabrata* Kunth fueron las especies dominantes, en el estrato herbáceo se registraron 58 especies de 26 géneros y 24 familias. La familia mejor representada fue la Asteraceae, de acuerdo con la diversidad alfa el índice de Simpson máximo se encontró en el estrato herbáceo del área bajo aprovechamiento maderable fue de 0.62, es decir, la mayor diversidad de especies del estrato arbustivo y herbáceo se tuvo bajo aprovechamiento maderable.

1.2. Justificación

Debido a que el tepetate, tiene una alta compactación y baja permeabilidad, así como baja disponibilidad de nutrientes y escasa actividad biológica, que limita su uso forestal, es fundamental su rehabilitación mediante el establecimiento de obras de conservación como lo son las zanjas-bordo, las cuales contribuyen al incremento

de la diversidad vegetal y la mejora en la calidad edáfica. Por otro lado, el suelo relicto de bosque se considera con mejor estructura vegetal, teniendo una capa orgánica rica en nutrientes, alta biodiversidad microbiana y buena capacidad de retención de agua, pero también debe continuar su proceso ecológico de rehabilitación. En este sentido, comparar las propiedades del suelo de relicto de bosque, degradado con zanjas bordo y de tepetate, proporciona información sobre los cambios o mejoras que contribuyen el establecimiento de obras de conservación en suelos degradados.

La evaluación de la calidad edáfica (análisis de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo) es fundamental para comprender la capacidad productiva y el potencial de restauración de diferentes tipos de suelo como los que se presentan en el área de estudio, asimismo la diversidad vegetal contribuye a evaluar cómo se modifica la estructura vegetal en beneficio de la recuperación de la vocación forestal que tenían estos sitios. La evaluación continua de las obras de conservación como las zanjas-bordo es esencial para determinar el impacto en la rehabilitación de estos suelos degradados.

1.3. Hipótesis

La calidad edáfica y la diversidad vegetal difieren significativamente entre el relicto de bosque, el suelo de tepetate y el suelo rehabilitado con zanjas-bordo, donde estas últimas contribuyen positivamente a la mejora de la calidad del suelo y al establecimiento de la diversidad vegetal.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la calidad edáfica y la diversidad de especies vegetales en un suelo de relicto de bosque, degradado con zanja-bordo y de tepetate mediante el análisis de sus propiedades físicas, químicas y respiración microbiana, para determinar su impacto en la rehabilitación del área con antigua vocación forestal.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar las propiedades físicas, químicas y respiración microbiana en periodo de seca y de lluvia en suelos de relicto de bosque, degradado con zanja bordo y de tepetate de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 para determinar su calidad edáfica.
- Determinar la diversidad de las especies vegetales para su comparación en periodo de seca y de lluvia en suelos de relicto de bosque, degradado con zanja bordo y de tepetate, mediante el análisis de índices de vegetación.
- Analizar la relación entre la calidad edáfica y la diversidad vegetal en suelos en proceso de rehabilitación mediante zanjas-bordo, tepetate (suelo degradado) y en un relicto de bosque durante los periodos de lluvia y seca, utilizando el análisis de componentes principales, para identificar los principales atributos edáficos y biológicos asociados a la recuperación del suelo bajo condiciones estacionales.

1.5. Literatura citada

- Brockerhoff, E. G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D. I., Gardiner, B., González-Olabarria, J. R., Lyver, P. O. B., Meurisse, N., Oxbrough, A., Taki, H., Thompson, I. D., van der Plas, F., & Jactel, H. (2017). Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 26(13), 3005–3035. <https://doi.org/10.1007/S10531-017-1453-2>
- Comisión Nacional Forestal. (2023). *Manual de Obras y Prácticas de Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales* (6th ed.). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/910650/_Manual_de_Obras_y_Prcticas_de_Protecci_n__Restauraci_n_y_Conservaci_n_....pdf
- Condori-Castillo, G. (2012). Influencia de la Fragmentación en la Diversidad de la Flora Silvestre y en los Cambios de Uso de Suelo y Cobertura Vegetal en Huerta Huaraya, Puno. *Ecosistemas*, 21(1-2). <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/369>
- Cotler, H., Cram, S., Martínez Trinidad, S., & Bunge, V. (2015). Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, 2015(88), 6–18. <https://doi.org/10.14350/RIG.47378>

- de Sosa, L. L., Carmona, I., Panettieri, M., Griffith, D. M., Espinosa, C. I., Jara-Guerrero, A., Plaza, C., & Madejón, E. (2024). Ecosystem function associated with soil organic carbon declines with tropical dry forest degradation. *Land Degradation and Development*, 35(6), 2109–2121. <https://doi.org/10.1002/ldr.5047>
- Doria Treviño, O. A., Mendoza Aguilar, D. O., Gutiérrez Gutiérrez, M., & Pando-Moreno, M. (2021). Efecto de una obra de conservación de suelo en el patrón de distribución de la vegetación y funcionalidad del ecosistema. *E-CUCBA*, (17), 229–237. <https://doi.org/10.32870/ECUCBA.VI17.230>
- Echeverría-Pérez, E. G., Castañeda-Hidalgo, E., Robles, C., Martínez-Gallegos, V., Santiago-Martínez, G. M., & Rodríguez-Ortiz, G. (2023). Indicadores de calidad como herramientas útiles para evaluar el estado de la fertilidad del suelo. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10(1), 49–67. <https://doi.org/10.60158/rma.v10i1.376>
- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., & 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. <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a11>
- García Gallegos, E., Vázquez Cuecuecha, O. G., Guerra-De la Cruz, V., & Cocoltzi Pérez, F. J. (2023). Evaluación del efecto de obras de conservación en suelos forestales de Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(78), 34–57. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V14I78.1385>
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M. L., Montanarella, L., Muñoz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M. I., & Vargas, R. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1001699>
- Jaroszewicz, B., Cholewińska, O., Gutowski, J. M., Samojlik, T., Zimny, M., & Latałowa, M. (2019). Białowieża Forest—A Relic of the High Naturalness of European Forests. *Forests*, 10(10), 849. <https://doi.org/10.3390/F10100849>
- Kooch, Y., Kartalaei, Z. M., Amiri, M., Zarafshar, M., Shabani, S., & Mohammady, M. (2024). Soil health reduction following the conversion of primary vegetation covers in a semi-arid environment. *Science of The Total Environment*, 921(2), 171113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171113>
- Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C. A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R. I., Mellado-Vázquez, P. G., Malik, A. A., Roy, J., Scheu, S., Steinbeiss, S., Thomson, B. C., Trumbore, S. E., & Gleixner, G. (2015). Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, 6, 6707. <https://doi.org/10.1038/ncomms7707>
- MacLaurin, J., & Sterelny, K. (2008). *What Is Biodiversity?* (Blackwell Publishing). University of Chicago Press.

- Martínez-y-Pérez, J. L., Castillo-Campos, G., Santiago-Martínez, Ma. G., & Hernández-Cuevas, L. V. (2011). Análisis florístico en tepetates del estado de Tlaxcala. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(2), 623–637. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532011000200021&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2023, November 29). *AGROVOC Multilingual Thesaurus*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. https://agrovoc.fao.org/browse/agrovoc/en/page/c_a9645d28
- Prat, C., Ch, V. O., & Rugama, J. A. (2003). Impacto de la roturación y del manejo agronómico de un tepetate sobre su estructura. *Terra Latinoamericana*, 21(1), 109-115. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57321113.pdf>
- Rendón-Pérez, M. A., Hernández-de la Rosa, P., Velázquez-Martínez, A., Alcántara-Carbajal, J. L., & Reyes-Hernández, V. J. (2021). Composición, diversidad y estructura de un bosque manejado del centro de México. *Madera y Bosques*, 27(1). <https://doi.org/10.21829/MYB.2021.2712127>
- Reyes Carrillo, A., Martínez Menez, M. R., Rubio Granados, E., García Moya, E., & Exebio García, A. A. (2019). Impact of the ditch check dam system over the vegetation coverage of grasslands in the Mixteca region, State of Oaxaca. *Revista Terra Latinoamericana*, 37(3), 231–242. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V37I3.327>
- Romero-Barrios, C., García-Gallegos, E., & Hernández-Acosta, E. (2015). Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(5), 63–70. <https://www.reibci.org/publicados/2015/septiembre/1200108.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018, July 7). *Suelos, sostén de la vida humana*. <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/suelos-de-importancia-crucial-para-la-vida-humana-y-la-biodiversidad>
- Secretaría de Medio Ambiente y Colegio de Postgraduados. *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la república mexicana, escala 1:250 000*. Memoria Nacional 2001-2002. SEMARNAT y CP. México. 2003. https://www.researchgate.net/publication/307967321_SEMARNAT-CP_2003_Memoria_Nacional_2001-2002_Evaluacion_de_la_Degradacion_del_Suelo_causada_por_el_Hombre_en_la_Republica_Mexicana_escala_1250000_Memoria_Nacional
- Shen, C., Wang, J., Jing, Z., Qiao, N. H., Xiong, C., & Ge, Y. (2022). Plant diversity enhances soil fungal network stability indirectly through the increase of soil carbon and fungal keystone taxa richness. *Science of The Total Environment*, 818, 151737. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151737>
- Song, Y. H., Xu, F. B., Wang, M. H., Xie, Y. B., Tian, L. M., Lv, C. X., Zhang, X. W., Guo, Z. M., & Zhang, D. (2025). Plant Species Diversity Improves Soil Physicochemical Traits and Modulates Soil Microbial Community Structure,

- with a Pronounced Enhancement of Fungal Diversity in Urban Forests. *Plants* 2026, 15(1), 79. <https://doi.org/10.3390/PLANTS15010079>
- Susyan, E. A., Wirth, S., Ananyeva, N. D., & Stolnikova, E. V. (2011). Forest succession on abandoned arable soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity. *European Journal of Soil Biology*, 47(3), 169–174. <https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2011.04.002>
- Torres-Guerrero, C. A., Etchevers B., J. D., Fuentes-Ponce, M. H., Govaerts, B., León-González, F. De, & Herrera, J. M. (2013). Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra Latinoamericana*, 31(1), 71–84. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792013000100071&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Villar, M. C., Petrikova, V., Díaz-Raviña, M., & Carballas, T. (2004). Changes in soil microbial biomass and aggregate stability following burning and soil rehabilitation. *Geoderma*, 122(1), 73–82. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2003.12.005>

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El suelo

El suelo es el material estratificado que cubre la superficie terrestre, formado a partir de procesos químicos y biológicos, así como de la organización física de minerales y materia orgánica, y que es el soporte fundamental de los ecosistemas terrestres y de la vida humana (McBratney & Hartemink, 2024).

Karlen et al. (2003) mencionan que el suelo constituye la base fundamental para una gestión sostenible del territorio, ya que interviene en procesos clave como el ciclo de nutrientes y del agua, la filtración y neutralización de contaminantes, la descomposición de residuos vegetales, así como en el reciclaje de nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas.

2.1. Calidad edáfica

La calidad del suelo está determinada por propiedades y procesos inherentes y que interactúan dentro de un entorno vivo en constante cambio, además se concibe de manera holística, integrando las propiedades, procesos e interacciones biológicas, químicas y físicas que ocurren en el sistema edáfico, que pueden verse fuertemente influenciadas por el manejo y se miden principalmente en el horizonte superficial (0-25 cm) (Karlen et al., 2003) para determinar cómo se afecta la capacidad del suelo para realizar sus funciones (Castillo-Valdez et al., 2021).

De acuerdo con Nuñez-Peñaloza et al. (2023) las propiedades físicas del suelo están vinculadas a la eficiencia en el uso del agua, los nutrientes y los agroquímicos, así como la resistencia a la erosión. Las propiedades químicas se relacionan con las condiciones que influyen en las interacciones entre el suelo y las plantas, la calidad del agua, la capacidad de amortiguación del suelo y la disponibilidad de nutrientes para los organismos. Por su parte, las propiedades biológicas corresponden a los organismos y procesos que ellos desarrollan, cuya presencia o abundancia reflejan modificaciones o estados específicos de ciertas características o funciones del suelo.

De acuerdo con Karlen et al., (2003) el uso del suelo, el tipo y la textura de este, además del estado hídrico y los patrones climáticos estacionales se consideran para facilitar una interpretación más adecuada sobre la calidad del suelo.

2.2. Propiedades del suelo

2.3.1 Propiedades físicas

Densidad real

Es la densidad de las partículas sólidas del suelo, excluyendo el volumen de poros. De acuerdo con Weil & Brady (2017) la densidad real está dominada por la composición mineral y suele acercarse al valor típico de minerales silicatados de 2.65 g cm^{-3} ya que el cuarzo, el feldespato, las micas y los silicatos coloidales son los que constituyen la mayor parte de los suelos minerales y tienen densidades dentro del rango $2.60\text{-}2.75 \text{ g cm}^{-3}$. Así mismo, suelos con alto contenido de materia orgánica presentan una densidad de menores a 1.4 g cm^{-3} (Robinson et al., 2022).

Densidad aparente

Es la masa de suelo seco por unidad de volumen total, incluyendo los poros. Refleja el grado de compactación y estructura del suelo; valores altos indican suelos densos y con baja porosidad; la densidad aparente en suelos arenosos es más alta que los de textura más fina, debido a que los contenidos de materia orgánica generalmente son bajos y por ende las partículas sólidas tienen menos probabilidades de agregarse (Weil & Brady, 2017).

Como lo menciona Ma et al. (2025) una menor densidad aparente indica suelos más sueltos, lo que facilita el crecimiento de raíces y la infiltración de agua. La densidad aparente presente en suelos forestales va de 0.8 a 1.2 g cm^{-3} , por otro lado, los suelos muy compactos pueden tener densidades aparentes de 2.0 g cm^{-3} o incluso mayores; sin embargo, el crecimiento de las raíces en el suelo húmedo generalmente varía desde 1.45 g cm^{-3} en arcillas hasta 1.85 g cm^{-3} en arenas franco-arenosas (Weil & Brady, 2017).

Porosidad

La porosidad del suelo es un indicador importante de su calidad ya que influye directamente en la permeabilidad, aireación y capacidad de retención de agua, influyendo directamente en el desarrollo vegetal. Se define como la proporción del volumen total del suelo que está ocupada por poros y es resultado de la relación entre densidad aparente y densidad real. Es resultado del arreglo de las partículas de arena, limo y arcilla y de la acción de la materia orgánica y la biota del suelo. De acuerdo con su tamaño, los poros se clasifican como macroporos, mesóporos y microporos. Los poros resultantes de acuerdo con el acomodo de las partículas primarias se denominan poros texturales, y los poros más grandes, derivados de actividad biológica, el clima y las prácticas de manejo se denominan poros estructurales (Rabot et al., 2018).

La distribución y cantidad de poros puede modificarse por enmiendas, rotación de cultivos y prácticas que alteran físicamente el suelo, lo que se refleja en la calidad edáfica y la vegetación asociada (Ma et al., 2025; Robinson et al., 2022)

Textura

La textura se define como la proporción relativa de arena, limo y arcilla en el suelo, esta composición textural determina propiedades fundamentales como retención de agua, aireación, plasticidad y comportamiento en manejo. En particular la retención de agua se asocia principalmente a la fracción arcillosa considerando que tiene una mayor superficie específica y mayor capacidad para retener agua en los microporos del suelo (Polláková et al., 2021; Weil & Brady, 2017)

Arcilla

Las arcillas son partículas minerales con tamaño inferior a 0.002 mm. Debido a su pequeño tamaño y una mayor área superficial (Weil & Brady, 2017; Xing et al., 2024) benefician con una alta capacidad de adsorción de iones metálicos, moléculas orgánicas y agua, por medio de fisiosorción (fuerzas de Van der Waals, H-puentes) y quimisorción (enlaces más fuertes), además las arcillas se moldean fácilmente y

conservan su forma cuando después de secarse, también se endurecen y pierden plasticidad cuando son sometidas al calor (Kumari & Mohan, 2021)

Limo

Las partículas de limo tienen un tamaño de 0.050~0.002 mm, mayores que las de arcilla, su capacidad de adsorción e intercambio es menor que las partículas de arcilla, por lo que los nutrientes son fáciles de perder. Sin embargo, la presencia de esta partícula con la materia orgánica contribuye a la estabilidad de los agregados y la protección del carbono del suelo, contribuyendo al mantenimiento de la fertilidad y funcionalidad del ecosistema (Weil & Brady, 2017; Xing et al., 2024).

Arena

Las partículas de arena tienen un tamaño de 2.00~0.05 mm, son relativamente gruesas y tienen un área superficial relativamente pequeña, implica menor adsorción de partículas coloidales cargadas, en consecuencia, hay un baja CIC. Por lo que cuando hay más partículas de arena y una baja capacidad de intercambio, la capacidad de retención de nutrientes del suelo es débil, asimismo hay menor retención de humedad (Weil & Brady, 2017; Xing et al., 2024). Sin embargo, debido al tamaño de partícula, la arena aporta propiedades físicas, como un drenaje mejorado y mayor aireación, que son fundamentales para la actividad microbiana y la respiración de las raíces (Bhatt et al., 2025).

2.3.2 Propiedades químicas

pH

Es una medida logarítmica que expresa la actividad de los iones hidrógeno (H^+) en una solución, este valor define si un suelo es ácido, neutro o alcalino; la escala de medición es adimensional y se encuentra de 0 a 14, los valores menores a 7 indican suelos ácidos, valores cercanos a 7 suelos neutros y mayores a 7 suelos alcalinos (Weil & Brady, 2017). Así mismo, el pH controla la disponibilidad de nutrientes,

actividad microbiana y la estabilidad de minerales presentes en los suelos, además de la movilidad de elementos potencialmente tóxicos (Neina, 2019).

En suelos forestales se presentan suelos ligeramente a moderadamente ácidos que van de 4.5 a 6.5 (Weil & Brady, 2017). De acuerdo con Álvarez Solís et al. (2000) el tepetate presenta un pH entre 6.9 a 7.8.

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es una medida de la capacidad de la solución del suelo para conducir corriente eléctrica a través de sus poros llenos de agua mediante los iones disueltos en el suelo que realizan la conducción como Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- . Es un parámetro que influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas, valores elevados de CE pueden provocar condiciones de estrés osmótico y limitar la absorción de agua y nutrimentos, por la cual la CE es un indicador de la salinidad del suelo (Schillaci et al., 2025; Weil & Brady, 2017).

Materia orgánica

Se refiere a los residuos vegetales y animales en distintos grados de descomposición, así como biomasa microbiana y sustancias húmicas. La presencia de materia orgánica favorece el aporte y la conservación de nutrientes en el suelo, lo que incrementa su disponibilidad. La materia orgánica es fundamental en la formación y estabilidad de los agregados, mejorando algunas propiedades físicas como la permeabilidad, la aireación y la capacidad de retención de humedad. También regula la actividad biológica y la capacidad de intercambio catiónico, y actúa como un amortiguador frente a cambios químicos del suelo (Ma et al., 2025; Weil & Brady, 2017).

Capacidad de intercambio catiónico

Es la cantidad total de cationes que el suelo puede adsorber reversiblemente en sus superficies cargadas negativamente, principalmente arcillas y materia orgánica.

Regula la fertilidad, retención de nutrientes y su comportamiento ante los cambios en el pH (Weil & Brady, 2017).

El contenido de intercambio catiónico es la suma total de cationes adsorbidos en el suelo, y cuanto mayor sea el contenido de arcilla, más fuerte será la capacidad de adsorción del suelo, y mayor será la cantidad de cationes adsorbidos. El contenido de intercambio de los minerales varía generalmente con el tamaño de las partículas, disminuyendo al aumentar el tamaño, asimismo el efecto de las partículas del suelo sobre el CIC proviene principalmente del contenido de arcilla, y a su vez ambos están correlacionados (Xing et al., 2024).

Bases intercambiables

Las bases intercambiables se refieren a los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) adsorbidos en los sitios de intercambio del suelo y pueden ser sustituidos por otros cationes. Su proporción define la saturación de bases y afecta la estructura, pH y fertilidad (Weil & Brady, 2017).

La composición de las bases intercambiables afecta la estabilidad estructural del suelo, a mayor Na^+ las partículas de arcilla se dispersan y degradan la estructura, sin embargo, el Ca^{2+} y Mg^{2+} favorecen la agregación de partículas, por su parte el K^+ tiene un efecto intermedio, asimismo cuando hay lixiviación de Na^+ , existe un incremento en la proporción de Ca^{2+} - K^+ - Mg^{2+} (Yan et al., 2024).

La capacidad de intercambio catiónico, el contenido de carbono orgánico y la proporción de arcilla determinan cuánto de estos cationes puede retener un suelo (de Albuquerque et al., 2024).

Nitrógeno inorgánico

El nitrógeno inorgánico es una forma de nitrógeno disponible para las plantas que incluye principalmente amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-). Proviene de mineralización, fertilización y procesos microbianos como la nitrificación (Weil & Brady, 2017).

Las plantas en general tienen una alta demanda de nitrógeno, de manera que la disponibilidad de este elemento es fundamental y puede limitar su crecimiento y desarrollo, es decir, a mayor disponibilidad de nitrógeno la descomposición microbiana de las fuentes de carbono se incrementa y, por tanto, la cantidad de compuestos de humus se reduce. En suelos ácidos se absorbe mejor en forma de nitratos, mientras que en suelos neutros en forma de amonio (Grzyb et al., 2021).

Fósforo extractable

Es la fracción de fósforo que puede ser extraída mediante métodos químicos estándar y representa la forma más disponible para las plantas. Depende del pH, tipo de mineral y presencia de hierro (Fe), aluminio (Al) y calcio (Ca) (Weil & Brady, 2017).

En suelos ácidos, la presencia de óxidos de aluminio y hierro reduce la solubilidad del fósforo inorgánico debido a su fijación en superficies con carga positiva y a la formación de compuestos insolubles. Por otro lado, en suelos alcalinos el fósforo reacciona con el calcio, formando fosfatos de calcio de baja solubilidad, lo que limita su disponibilidad para las plantas (Johan et al., 2021; Pereira et al., 2020).

2.3.3 Propiedad biológica

Respiración microbiana

Es la cantidad de CO₂ que liberan los microorganismos del suelo durante la descomposición de materia orgánica en un periodo determinado. Indica actividad biológica, disponibilidad de carbono y salud del suelo (Weil & Brady, 2017).

Los microorganismos son importantes en el metabolismo del suelo como descomponedores que promueven la renovación de nutrientes en los ecosistemas del suelo al mineralizar la materia orgánica; en suelos forestales intervienen en la descomposición de la hojarasca y en el ciclo de nutrientes del suelo, por lo que los microorganismos son indicadores biológicos significativos para evaluar la salud del suelo (Qu et al., 2023).

2.3. Degradación de suelos

La degradación del suelo es un problema global que se manifiesta como una disminución en su capacidad para proporcionar servicios ambientales de manera sostenible, tanto de forma directa como indirecta; afecta la calidad de vida de las poblaciones humanas, ya que el suelo es un recurso natural valioso que sustenta diversas actividades esenciales. La pérdida de funcionalidad del suelo compromete la producción de alimentos, la disponibilidad de agua y la biodiversidad, lo que incrementa la emisión de gases de efecto invernadero (Gardi et al., 2014).

De acuerdo con el estudio denominado “Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana”, el 44.9% del territorio nacional presentaba evidencias de degradación en 2002. Provocados principalmente por la degradación química que afectaba 34.04 millones de hectáreas que corresponde al 17.8% del país; seguida por la erosión hídrica con una superficie de 22.72 millones de ha, correspondiente al 11.9% del territorio; mientras que la erosión eólica afectaba 18.12 millones de ha, correspondiente a 9.5% del territorio; y la degradación física ocupaba 10.84 millones de ha, con una extensión del 5.7% del territorio (Semarnat & CP, 2003).

Como parte del estudio para delimitar la Línea Base Nacional de Degradación de Tierras, se estimó que el 61.7% de la superficie nacional se encuentra afectada por erosión hídrica, eólica y degradación química y física (Conafor & UACH, 2013).

Para el caso de Tlaxcala existe una superficie mayor conformada por suelo de tepetate, según Gama-Castro et al., (2007) el tepetate es una capa muy dura que aflora o subyace a un suelo, caracterizado por su baja porosidad, limitada actividad biológica y baja fertilidad. Werner (1992) estimó que Tlaxcala tenía el 54% de su superficie de estas capas endurecidas. Bolaños González et al. (2016) reportaron que el 92.99% de la superficie del estado mostró problemas de erosión hídrica.

De acuerdo con Velázquez-Rodríguez et al. (2022) la degradación de suelos, especialmente en regiones con tepetate, representa un desafío significativo para la

sostenibilidad agrícola y la conservación ambiental. La transformación de tepetates en suelos productivos depende del manejo adecuado que promueve la estructuración y formación de agregados.

La degradación del suelo afecta sus componentes y propiedades, incluye la pérdida de estructura y agregación, disminución de la capacidad de infiltrar agua, acidificación y acumulación de sales, así como la pérdida de biota y necromasa edáfica (Bonfante et al., 2019; Lal, 2016).

2.4. Tepetate

El tepetate es un material geológico de origen volcánico que, de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas como una alta compactación, baja retención de humedad, materia orgánica, porosidad y fertilidad, limitan el desarrollo de especies vegetales (Velázquez-Rodríguez et al., 2022).

Según Peña H. & Zebrowski (1992) estimaron que existían aproximadamente 4 millones de hectáreas de tepetates en México, principalmente en las faldas de la Sierra Nevada, se puede apreciar en los estados de Tlaxcala, Estado de México y Puebla, sin embargo, también en estados cercanos a estos como los son Hidalgo, Querétaro y Morelos. La distribución de los suelos es de acuerdo con la distribución climática altitudinal, por ello los tepetates están intercalados en los suelos del piedemonte y de glaciares. Sobre el piedemonte los tepetates tienen una consistencia de fragipán que se caracteriza por ser duro en estado seco y friable en húmedo (Servénay & Prat, 2000).

Considerando las propiedades del tepetate de acuerdo con Peña H. & Zebrowski (1992) en Tlaxcala se encuentran los correspondientes a la serie T2 que se caracterizan con un color gris a café claro; arcillas esmectitas, interestratificadas y ópalo; y la serie T3 con un color que va de café a café rojizo; arcillas de tipo haloisita; óxidos de hierro y ópalo. Contienen entre 25 y 54% de arcilla, su dureza varía según el contenido calcáreo, los poco o no calcáreos son friables y plásticos; mientras que, los encostrados con caliza son extremadamente duros y resistentes (duripán), y los

moderadamente calcáreos tienen características intermedias. Su densidad promedio es de 2.65 g/cm^3 , con baja porosidad, lo que limita el drenaje y la aireación, que limita el desarrollo radicular y contribuye a tener suelos estériles.

De acuerdo con la investigación realizada por Etchevers-Barra et al., 1992 se presentan algunas características químicas del tepetate, entre lo cual destaca que los T3 son más superficiales, fértiles en términos de retención de nutrientes, pero pobres en materia orgánica; los T2 son intermedios en propiedades químicas, con menor alcalinidad y capacidad de retención de nutrientes.

Los tepetates constituyen un factor importante de la degradación de los suelos en algunas regiones de los estados de México y de Tlaxcala, la implementación de zanjas bordo ha demostrado beneficios significativos en la rehabilitación de suelos degradados, teniendo un impacto positivo en varias propiedades químicas y biológicas del suelo (García Gallegos et al., 2023).

2.5. Rehabilitación de suelos

La rehabilitación del suelo es una práctica que consiste en la recuperación únicamente de las funciones y procesos degradados, sin restablecer necesariamente la condición natural, pero sí cierta estabilidad geológica e hidrológica (Gardi et al., 2014). La rehabilitación es importante en ecosistemas degradados para la conservación de la biodiversidad amenazada y única de tierras áridas y semiáridas, así como en los diversos ecosistemas que estos tienen (Yirdaw et al., 2017).

2.6.1 Obras de conservación y rehabilitación de suelos

La Comisión Nacional Forestal (2023) menciona que existen obras de conservación que contribuyen a la restauración de las áreas forestales degradadas del país, como lo son: zanja bordo, zanja trinchera, terrazas de formación sucesiva, terrazas individuales, bordos en curvas de nivel, roturación, barreras de piedra acomodada en curvas de nivel, acomodo de material vegetal muerto, practicas vegetativas, terrazas de muro vivo y barreras vivas, estas obras se realizan para el control de la

erosión laminar y contribuyen en retener suelo y sedimentos; disminuyen el grado y longitud de la pendiente; impiden la formación de cárcavas; reducen el contenido de sedimentos en el agua de escorrentía; captan agua de lluvia, propiciando su infiltración; interceptan escurrimientos y disminuyen su velocidad; incrementan la humedad en el suelo, lo que coadyuva al establecimiento de la vegetación forestal.

Las obras de conservación proporcionan beneficios integrales en el suelo, el agua y los agroecosistemas, contribuyendo a la reducción en la pérdida del suelo, incrementa la cobertura superficial por parte de las plantas y sus residuos, mejora la biodiversidad y maximiza la presencia y extensión de raíces vivas. Estas obras reducen aproximadamente 80-84% la pérdida de suelo por erosión hídrica y la escorrentía aproximadamente de 50-67%, especialmente cuando incluyen obras en contorno, terrazas, zanjas y otras barreras físicas (Du et al., 2022).

Zanjas bordo

Las zanjas bordo se destacan como una técnica efectiva la cual comienza con la roturación, nivelación, y la construcción de los bordes para mejorar las propiedades edáficas y restaurar la funcionalidad del suelo, las cuales están diseñadas para captar y almacenar agua de escorrentía, facilitando su infiltración y reduciendo la erosión superficial. La mejora en las condiciones edáficas generada por esta práctica crea un ambiente favorable para el establecimiento y desarrollo de la vegetación, y contribuye a los procesos de rehabilitación ecológica de estos sitios (Martínez et al., 2018).

Sin embargo Cotler et al. (2015) indicaron que su construcción tiene impactos negativos, como la remoción de suelos y la exposición de carbono orgánico, además, no mejoran las condiciones de retención de humedad necesarias para la reforestación. Por lo cual sugieren que la construcción de estas obras se realice en sitios con clima árido o semiárido, pendientes moderadas, suelos poco profundos y con poca vegetación.

2.6. Relicto de bosque

Los relictos de bosque son remanentes de bosques originales que han sobrevivido a la fragmentación y transformación del paisaje causado por actividades humanas. Estos sistemas conservan una estructura, composición y procesos ecológicos cercanos a los bosques originales, por lo que funcionan como referentes fundamentales para la comparación y evaluación de las condiciones edáficas en suelos degradados (Jaroszewicz et al., 2019). Estos relictos pueden ser más susceptibles a los cambios climáticos, las enfermedades y la tala (Tabarelli et al., 2012).

Los relictos de bosque funcionan como sistemas de referencia frente a los cuales se evalúa el éxito de la restauración ya que representan el estado de mejores condiciones de biodiversidad y estructura de la vegetación, aunque la restauración mejora estas condiciones respecto a los sistemas degradados, no se alcanza totalmente las condiciones de los relictos de bosque (Crouzeilles et al., 2016).

2.7. Diversidad vegetal

La diversidad de especies es un tema central tanto en ecología de comunidades como en biología de la conservación. Su estudio ha adquirido mayor relevancia en los últimos años, debido a su posible relación con el funcionamiento de los ecosistemas a través de procesos tales como la productividad y la estabilidad y por su modificación como resultado de actividades humanas (Maclaurin & Sterelny, 2008).

Determinar la diversidad de especies es importante para comprender la naturaleza y así optimizar su uso, conservación de recursos naturales o recuperación de los ecosistemas degradados. Una forma práctica de medir la diversidad es utilizar la riqueza de especies, que es el número de especies presentes en una comunidad o área de interés determinada (Melo, 2008).

La presencia de la diversidad vegetal en los ecosistemas es importante para evitar la pérdida del suelo ante la erosión hídrica o eólica y mantener las partículas en su

lugar, una cobertura densa de hierbas ofrece una protección considerable al suelo, mientras que, el follaje evita que el impacto directo de las gotas de lluvia desprenda partículas del suelo. Además, las raíces absorben la humedad del suelo y ayudan a profundizar los niveles freáticos, lo que reduce la acumulación de agua en la superficie y, con ello, el riesgo de que el suelo se reblandezca y se produzcan deslizamientos (Blanco-Valdes, 2016).

La diversidad vegetal incluye los estratos arbustivos y herbáceos que son especies con diferentes hábitos de crecimiento, ciclos de vida y estrategias funcionales, fundamentales en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas terrestres (Magurran, 2004).

2.8.1 Estrato arbustivo

El estrato arbustivo se compone de especies leñosas de porte medio, usualmente con varios tallos que se ramifican desde la base y su altura es menor que la de los árboles dominantes. Asimismo, presentan altura suficiente para dominar el estrato herbáceo y no necesitan rehacer tanta biomasa cada año como las hierbas, algunos arbustos son semileñosos, caracterizados por ser leñosos en la parte inferior del tallo y herbáceos en la superior (Götmark et al., 2016).

La cobertura arbustiva es importante para mantener la regeneración de los árboles especialmente ante la mortalidad natural que ocurre en el ecosistema. Asimismo, los parches arbustivos conforman una estructura paisajística que contribuye a la diversidad vegetal y funcionalidad del ambiente (Tölgyesi et al., 2018).

2.8.2 Estrato herbáceo

El estrato herbáceo se caracteriza por ser de ciclo de vida anuales, bienales y perennes, usualmente sus tallos no son leñosos y de bajo porte, derivado de su ciclo de vida corto y la alta capacidad de colonización, permite un rápido recambio de especies ante variaciones ambientales y de sucesión, por lo que, en ecosistemas secos o degradados, muchas especies herbáceas efímeras o anuales pueden completar su ciclo en breves periodos de humedad de tal forma que su riqueza y

biomasa se correlacionan positivamente con humedad, nitrógeno y otros nutrientes del suelo contribuyendo a la generación de la biomasa en el ecosistema forestal (Awasthi et al., 2021; Yao et al., 2025).

Las herbáceas son capaces de responder de forma rápida y sensible a disturbios en los ecosistemas, ya que se modifica su composición, riqueza y cobertura, y es un indicador de historia de uso del suelo y de la condición edáfica actual (Rehling et al., 2021).

2.8. Índices de vegetación

Los índices de diversidad describen lo diverso que puede ser un sitio, considerando el número de especies (riqueza) y el número de individuos de cada especie (Mostacedo & Fredericksen, 2000). En términos de diversidad de especies es necesario diferenciar entre riqueza de especies que es el total de especies presentes en una comunidad y diversidad de especie que es el número y la distribución de la abundancia de las especies en la comunidad.

2.9.1 Riqueza de especies

La riqueza de especies refiere al total de especies que integran un grupo biológico determinado dentro de un área específica. Aunque en la actualidad estos índices han sido objeto de críticas debido a que sintetizan en un solo valor información ecológica compleja que podría analizarse de forma más detallada, continúan siendo ampliamente empleados en estudios florísticos y ecológicos como herramientas comparativas para evaluar la diversidad entre distintos tipos de hábitat (Mostacedo & Fredericksen, 2000).

2.9.2 Diversidad de especies

La diversidad alfa es la riqueza de especies de una comunidad particular a la que consideramos homogénea, es medido por la riqueza específica que se basa en la cuantificación del número de especies presentes (riqueza específica) y la estructura que se basa en la distribución proporcional del valor de importancia de cada

especie, en esta última se encuentran el índice de Shannon-Wiener y de Simpson y, por otro lado la diversidad beta es el grado de cambio o reemplazo en la composición de especies entre diferentes comunidades en un paisaje medido a través del coeficiente de similitud de Sørensen (Moreno, 2001).

Índice de Shannon-Wiener

El índice de Shannon-Wiener (H') es un indicador de diversidad que se basa principalmente en la equidad, el cual integra el número de especies presentes con la proporción relativa de sus abundancias y refleja la heterogeneidad de una comunidad (Martínez Arévalo, 2022). Aunque, este índice puede generar interpretaciones sesgadas, ya que se pueden presentar valores similares de riqueza y equidad en comunidades con estructuras diferentes, la fórmula empleada para su estimación se presenta en la ecuación 1 (Strong, 2016).

$$H' = - \sum P_i * \ln (P_i) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

H' = Índice de Shannon-Wiener;

P_i = Abundancia relativa;

$\ln (P_i)$ = Logaritmo natural de P_i .

Para su interpretación valor del índice de diversidad de Shannon-Wiener va de 0-1.35 diversidad baja; 1.36-3.5 diversidad media, y mayor a 3.6 diversidad alta (Astudillo Sánchez et al., 2019).

En particular, H' tiende a ser más sensible a las variaciones en la equidad que a los cambios en la riqueza, por lo que es recomendable complementarlo con cálculos independientes de riqueza y equidad para una mejor interpretación como lo es el índice de Simpson (Strong, 2016).

Índice de Simpson

Es la probabilidad de que dos organismos tomados aleatoriamente de una comunidad sean de la misma especie, es un índice basado en la dominancia de las especies y toma en cuenta la representatividad de las especies con mayor valor de importancia sin evaluar la contribución del resto de las especies (Moreno, 2001). Su cálculo se realiza por medio de la ecuación 2, el índice va de 0 (mayor diversidad del hábitat) a 1 (menor diversidad del hábitat) (Martínez Arévalo, 2022; Velázquez Velázquez et al., 2008). De acuerdo con Astudillo Sánchez et al. (2019) el valor de 0.01-0.33 indica baja dominancia y alta diversidad; de 0.34-0.66 dominancia y diversidad media; y mayor a 0.67 alta dominancia y baja diversidad.

$$D = \sum p_i^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

D = Índice de Simpson;

p_i = Proporción de la especie i en la comunidad (n_i/N).

El índice de Simpson mide el grado de dominancia de unas cuantas especies en la comunidad, y su inverso representa por lo tanto la equidad (Magurran, 1988; Moreno, 2001). El valor inverso muestra la probabilidad de que dos organismos tomados aleatoriamente sean de diferente especie. Este rango del índice de Simpson (1-D) va de 0 baja diversidad a 1 alta diversidad y su cálculo se realiza mediante la ecuación 3.

$$1 - D = 1 - \sum (p_i)^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

Coeficiente de similitud de Sørensen

Los coeficientes de similitud se utilizan para comparar comunidades con atributos similares. Son útiles para comparaciones de las comunidades de plantas en sitios

con distintos grados de perturbación que nos indica en que grado dos sitios son semejantes debido a las especies que se encuentran en ellos (Mostacedo & Fredericksen, 2000).

El coeficiente de similitud de Sørensen es el más utilizado para el análisis de comunidades y permite comparar dos comunidades mediante la presencia/ausencia de especies en cada una de ellas y su cálculo se realiza mediante la ecuación 4, el coeficiente va de 0 (no hay especies en común), 0.5 (similitud moderada) y 1 (comunidades idénticas) (Velázquez Velázquez et al., 2008).

$$S_s = \frac{2a}{2a + b + c} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

S_s = coeficiente de similitud de Sørensen;

a =número de especies compartidas;

b = número de especies en la muestra B, pero no en A;

c = Número de especies en la muestra A, pero no en B.

2.9. Relación suelo-agua-planta

La capacidad de un suelo para retener agua está directamente relacionada con la proporción de arena, limo y arcilla, además de cómo están formados los agregados. Es decir, suelos con alta porosidad y adecuada capacidad de retención de agua proporcionan un suministro hídrico más constante a las plantas. Sin embargo, la compactación del suelo o la presencia de capas impermeables pueden limitar la disponibilidad de agua, afectando el desarrollo vegetal (Lozano-Parra, 2018).

La relación agua-suelo-planta es fundamental para la agricultura y el manejo sostenible de los recursos naturales. Esta relación está influenciada por la estructura y porosidad del suelo, así como por las fuerzas capilares y osmóticas. Las plantas

absorben agua a través de sus raíces, impulsadas por gradientes de potencial hídrico. La disponibilidad de agua está determinada por factores físicos y químicos del suelo. La gestión adecuada de esta relación es crucial para optimizar el riego, mejorar la productividad agrícola y mantener la salud del ecosistema (López, 2000).

La materia orgánica contribuye al incremento en la capacidad de retención de humedad del suelo al mejorar su estructura y porosidad. Además, contribuye a la formación de agregados estables que facilitan la infiltración y almacenamiento de agua (Šimanský et al., 2023).

2.10. Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) tiene como objetivo reducir un conjunto de datos con múltiples variables a un número menor de componentes, conservando la mayor proporción posible de la variabilidad original. Este método transforma las variables originales en nuevos ejes definidos como combinaciones lineales de dichas variables, los cuales son estadísticamente independientes entre sí. Por lo tanto, el análisis de las observaciones en este nuevo espacio facilita la interpretación y comprensión de la estructura y patrones presentes en los datos (Górecki et al., 2016; Sánchez López et al., 2016).

2.11. Literatura citada

- Álvarez Solís, J. D., Ferrera Cerrato, R., & Etchevers Barra, J. D. (2000). Actividad microbiana en tepetate con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia*, 34(5), 523–532. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30234501.pdf>
- Astudillo Sánchez, E., Pérez, J., Troccoli, L., & Aponte, H. (2019). Composición, estructura y diversidad vegetal de la Reserva Ecológica Comunal Loma Alta, Santa Elena, Ecuador. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90(3), 1–25. <https://revista.ib.unam.mx/index.php/bio/article/view/2871/2017>
- Awasthi, P., Bargali, K., & Bargali, S. S. (2021). Composition, structure and productivity of the herbaceous vegetation of five forest stands varying in soil moisture and nitrogen in Central Himalaya, India. *Eurasian Journal of Forest Science*, 9(1), 29–42. <https://doi.org/10.31195/EJEJFS.841095>
- Bhatt, R., Kunal, Garg, A. K., Majumder, D., Verma, K. K., & Wagner de Oliveira, M. (2025). Soil Texture: Unlocking Fertility and Productivity for Better Crops.

- Agriculture Association of Textile Chemical and Critical Reviews*, 13(3), 396–408. <https://doi.org/10.21276/aatccreview.2025.13.03.396>
- Blanco-Valdes, Y. (2016). The role of weeds as a component of biodiversity in agroecosystems. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 34–56. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10964.19844>
- Bolaños González, M. A., Paz Pellat, F., Cruz Gaistardo, C. O., Argumedo Espinoza, J. A., Romero Benítez, V. M., & de la Cruz Cabrera, J. C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271–288. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300271&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Bonfante, A., Terribile, F., & Bouma, J. (2019). Refining physical aspects of soil quality and soil health when exploring the effects of soil degradation and climate change on biomass production: An Italian case study. *SOIL*, 5(1), 1–14. <https://doi.org/10.5194/SOIL-5-1-2019>
- Castillo-Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo-Moreno, C. Ma. I., Aguirre-Gómez, A., Castillo-Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo-Moreno, C. Ma. I., & Aguirre-Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.698>
- Comisión Nacional Forestal. (2023). *Manual de Obras y Prácticas de Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales* (6a ed.). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/910650/_Manual_de_Obras_y_Prcticas_de_Protecci_n__Restauraci_n_y_Conservaci_n_....pdf
- Comisión Nacional Forestal, & Universidad Autónoma Chapingo. (2013). *Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD003147.pdf>
- Cotler, H., Cram, S., Martínez Trinidad, S., & Bunge, V. (2015). Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2015(88), 6–18. <https://doi.org/10.14350/RIG.47378>
- Crouzeilles, R., Curran, M., Ferreira, M. S., Lindenmayer, D. B., Grelle, C. E. V., & Rey Benayas, J. M. (2016). A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success. *Nature Communications*, 7, 11666. <https://doi.org/10.1038/ncomms11666>
- de Albuquerque, C. G., Gavelaki, F., Matera, H. B., Motta, A. C. V., Prior, S. A., Ercole, T. M., & Araújo, E. M. (2024). Relationship between pH and base saturation associated with soil cation exchange capacity in soils of Mato Grosso do Sul, Brazil. *Bragantia*, 83, e20230291. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20230291>

- Du, X., Jian, J., Du, C., & Stewart, R. D. (2022). Conservation management decreases surface runoff and soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(2), 188–196. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2021.08.001>
- Etchevers-Barra, J. D., López R., R. M., Zebrowski, C., & Peña H., D. (1992). Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y Tlaxcala, México. *Terra Latinoamericana*, 10, 171–177. <https://www.researchgate.net/publication/282167712>
- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., & 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. <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a11>
- García Gallegos, E., Vázquez Cuecuecha, O. G., Guerra-De la Cruz, V., & Cocoltzi Pérez, F. J. (2023). Evaluación del efecto de obras de conservación en suelos forestales de Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(78), 34–57. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V14I78.1385>
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M. L., Montanarella, L., Muñiz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M. I., & Vargas, R. (eds) (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1001699>
- Górecki, T., Krzyśko, M., Waszak, Ł., & Wołyński, W. (2016). Selected statistical methods of data analysis for multivariate functional data. *Statistical Papers* 2016 59:1, 59(1), 153–182. <https://doi.org/10.1007/S00362-016-0757-8>
- Götmark, F., Götmark, E., & Jensen, A. M. (2016). Why be a shrub? A basic model and hypotheses for the adaptive values of a common growth form. *Frontiers in Plant Science*, 7:1095. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.01095/BIBTEX>
- Grzyb, A., Wolna-Maruwka, A., & Niewiadomska, A. (2021). The Significance of Microbial Transformation of Nitrogen Compounds in the Light of Integrated Crop Management. *Agronomy*, 11(7), 1415. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11071415>
- Jaroszewicz, B., Cholewińska, O., Gutowski, J. M., Samojlik, T., Zimny, M., & Latałowa, M. (2019). Białowieża Forest—A Relic of the High Naturalness of European Forests. *Forests*, 10(10), 849. <https://doi.org/10.3390/F10100849>
- Johan, P. D., Ahmed, O. H., Omar, L., & Hasbullah, N. A. (2021). Phosphorus Transformation in Soils Following Co-Application of Charcoal and Wood Ash. *Agronomy*, 11(10), 2010. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11102010>

- Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality: why and how?. *Geoderma*, 114(3-4), 145-156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)
- Kumari, N., & Mohan, C. (2021). Basics of Clay Minerals and Their Characteristic Properties. En G. M. Do Nascimento (Ed.), *Clay and Clay Minerals* (p. 29). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.97672>
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212–222. <https://doi.org/10.1002/FES3.96>
- López, Y. (2000). *Relaciones hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera*. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51905>
- Lozano-Parra, Javier. (2018). Recursos hídricos. Disponibilidad, variabilidad y gestión. *Revista de geografía Norte Grande*, (71), 5-8. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022018000300005>
- Ma, Y., Cao, B., Wang, X., & Chen, W. (2025). Effect of intercropping *Lolium perenne* in *Ziziphus jujuba* orchards on soil quality in the canopy. *PeerJ*, 13(2), e18710. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.18710/SUPP-1>
- MacLaurin, J., & Sterelny, K. (2008). *What Is Biodiversity?* (Blackwell Publishing). University of Chicago Press.
- Magurran, A. E. (2004). Measuring biological diversity. Edition Illustrated. En *Blackwell Publishing, Massachusetts*. Blackwell Science Ltd.
- Magurran, A. E. 1988. Ecological diversity and its measurement. Princeton University Press, New Jersey, 179 pp.
- Martínez Arévalo, J. V. (2022). El cálculo de diversidad biológica. Parte I: Diversidad biológica alfa. *Tikalía*, 41(1), 48–62. https://www.researchgate.net/profile/Jose-Vicente-Martinez-Arevalo/publication/372854379_El_calculo_de_diversidad_biologica_Parte_I_Diversidad_biologica_alfa/links/64ca8f3c91fb036ba6bfa747/El-calculo-de-diversidad-biologica-Parte-I-Diversidad-biologica-alfa.pdf
- Martínez, C. M., Cuecuecha, O. V., Campos, E. Z., López, A. L., Rivera, C. I. C., & Gallegos, E. G. (2018). La importancia de rehabilitar tepetate con *Lupinus campestris* Cham. & Schltdl. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 6(2.Especial), 49–55. <https://doi.org/10.47808/REVISTABIOAGRO.V6I2.ESPECIAL.256>
- McBratney, A. B., & Hartemink, A. E. (2024). Define soil. *Soil Security*, 14(10), 100135. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100135>
- Melo, A. S. (2008). O que ganhamos “confundindo” riqueza de espécies e equabilidade em um índice de diversidade? *Biota Neotropica*, 8(3), 21–27. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032008000300001>
- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad* (Vol. 1). M&T-Manuales y Tesis SEA. <http://entomologia.rediris.es/sea>

- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal* (D. Nash, Ed.). El País. <http://www.bio-nica.info/Biblioteca/Mostacedo2000EcologiaVegetal.pdf>
- Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019(1), 5794869. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Núñez-Peñaloza, J. L., Pérez-Nieto, J., Prado-Hernández, J. V., Núñez-Peñaloza, J. L., Pérez-Nieto, J., & Prado-Hernández, J. V. (2023). Análisis de indicadores e índices de calidad de suelos en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 14(6). <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V14I6.3148>
- Peña H., D., & Zebrowski, C. (1992). Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. *Terra*, 10, 156–163. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/38566.pdf
- Pereira, D. S., Costa, L. M. da, Carmo, D. L. do, & Rocha, A. C. T. (2020). Availability and fractionation of phosphorus in soils with different physicochemical characteristics. *Revista Agro@ambiente on-line*, 14. <https://doi.org/10.18227/1982-8470RAGRO.V14I0.6811>
- Polláková, N., Šimanský, V., & Jonczak, J. (2021). The Relationships of Texture and Hydrophysical Properties in Soil Profiles Under Selected Exotic Trees in the Context of Climate Change in Central Europe. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 244–252. <https://doi.org/10.12911/22998993/137677>
- Qu, R., Liu, G., Yue, M., Wang, G., Peng, C., Wang, K., & Gao, X. (2023). Soil temperature, microbial biomass and enzyme activity are the critical factors affecting soil respiration in different soil layers in Ziwuling Mountains, China. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1105723. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2023.1105723/BIBTEX>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2017.11.009>
- Rehling, F., Sandner, T. M., & Matthies, D. (2021). Biomass partitioning in response to intraspecific competition depends on nutrients and species characteristics: A study of 43 plant species. *Journal of Ecology*, 109(5), 2219–2233. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13635>;SUBPAGE:STRING:FULL
- Robinson, D. A., Thomas, A., Reinsch, S., Lebron, I., Feeney, C. J., Maskell, L. C., Wood, C. M., Seaton, F. M., Emmett, B. A., & Cosby, B. J. (2022). Analytical modelling of soil porosity and bulk density across the soil organic matter and land-use continuum. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11099-7>
- Sánchez López, A., Cruz-Gutiérrez, V., Posada-Zamora, M. A., Torrijos M., M. T., & Osorio Lama, M. A. (2016). A Study of Principal Components Analysis of Air Quality Databases. *Research in Computing Science*, 120, 9–19.

https://www.rcs.cic.ipn.mx/2016_120/Estudio%20del%20análisis%20de%20componentes%20principales%20en%20bases%20de%20datos%20de%20calidad%20del%20aire.pdf

- Schillaci, C., Scarpa, S., Yunta, F., Lipani, A., Visconti, F., Szatmári, G., Balog, K., Koganti, T., Greve, M., Bondi, G., Kargas, G., Londra, P., Kaya, F., Papa, G. Lo, Panagos, P., Montanarella, L., & Jones, A. (2025). Empirical estimation of saturated soil-paste electrical conductivity in the EU using pedotransfer functions and Quantile Regression Forests: A mapping approach based on LUCAS topsoil data. *Geoderma*, 454, 117199. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2025.117199>
- Secretaría de Medio Ambiente y Colegio de Postgraduados. *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la república mexicana, escala 1:250 000*. Memoria Nacional 2001-2002. SEMARNAT y CP. México. 2003. https://www.researchgate.net/publication/307967321_SEMARNAT-CP_2003_Memoria_Nacional_2001-2002_Evaluacion_de_la_Degradacion_del_Suelo_causada_por_el_Hombre_en_la_Republica_Mexicana_escala_1250000_Memoria_Nacional
- Servenay, A., & Prat, C. (2000). Classification from landsat TM of indurated volcanic materials (tepetates) of the mexican neo-volcanique belt. *Geocarto International*, 15(1), 57–63. <https://doi.org/10.1080/10106040008542140>
- Šimanský, V., Wójcik-Gront, E., Buchkina, N., & Horák, J. (2023). Managing soil organic matter through biochar application and varying levels of N fertilisation increases the rate of water-stable aggregates formation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 71(2), 199–209. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0004>
- Strong, W. L. (2016). Biased richness and evenness relationships within Shannon–Wiener index values. *Ecological Indicators*, 67, 703–713. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2016.03.043>
- Tabarelli, M. I., Almeida Santos, B. I., Arroyo-Rodríguez III, V., Pimentel, F., & Tabarelli, M. (2012). Secondary forests as biodiversity repositories in human-modified landscapes: insights from the Neotropics. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais*, 7(3), 319–328. <https://doi.org/10.46357/BCNATURAIS.V7I3.593>
- Tölgyesi, C., Bátori, Z., Gallé, R., Urák, I., & Hartel, T. (2018). Shrub Encroachment Under the Trees Diversifies the Herb Layer in a Romanian Silvopastoral System. *Rangeland Ecology & Management*, 71(5), 571–577. <https://doi.org/10.1016/J.RAMA.2017.09.004>
- Velázquez Velázquez, E., Pérez Farrera, M. ángel, & Chávez Cortazar, A. (2008). El análisis de la comunidad: parámetros y evaluaciones de la diversidad biológica. *Lacandonia*, 2, 131–139. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/1785>

- Velázquez-Rodríguez, A. S., Báez-Pérez, A., Hidalgo-Moreno, C., Parsa-Retana, M., Etchevers-Barra, J., & Paz-Pellat, F. (2022). Soil formation from tepetates: structural unities, organic carbon, and structural stability. *Revista Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V40I0.1447>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of soils* (D. Fox, Ed.; 15a ed.). Pearson.
- Werner, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: Distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra* 10 (Número especial), 318-331.
- Xing, Y., Yuan, H., Ji, X., Duan, C., Jiang, J., Liu, S., & Liu, P. (2024). 湖南典型岩溶土壤CEC、机械组成与矿物类型的响应. *中国岩溶*, 43(5), 1076–1087. <https://doi.org/10.11932/KARST2024Y037>
- Yan, S., Zhang, T., Zhang, B., Feng, H., & Siddique, K. H. M. (2024). Adverse effects of Ca²⁺ on soil structure in specific cation environments impacting macropore-crack transformation. *Agricultural Water Management*, 302, 108987. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2024.108987>
- Yao, S., Hu, W., Ji, M., Degen, A. A., Du, Q., Akram, M. A., Sun, Y., Sun, Y., Deng, Y., Dong, L., Gong, H., Hou, Q., Xie, S., Wang, X., Ran, J., Schmid, B., Guo, Q., Niklas, K. J., & Deng, J. (2025). Distribution, species richness, and relative importance of different plant life forms across drylands in China. *Plant Diversity*, 47(2), 273–281. <https://doi.org/10.1016/J.PLD.2024.09.007>
- Yirdaw, E., Tigabu, M., & Monge, A. (2017). Rehabilitation of degraded dryland ecosystems - review. *Silva Fennica*, 51(1). <https://doi.org/10.14214/SF.1673>

CAPÍTULO 3. CALIDAD EDÁFICA Y REHABILITACIÓN DE TEPETATES CON ZANJAS BORDO EN TLAXCALA, MÉXICO*

Velasco-Sánchez Ana. R.¹; García-Gallegos, E.³; Cristóbal-Acevedo, D.²; Hernández-Acosta, E.^{2*}

¹Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales y del Ambiente. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56230.

²Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos. Texcoco, Estado de México. C. P. 56230.

³Universidad Autónoma de Tlaxcala, Centro de Investigación en Genética y Ambiente. San Felipe Ixtacuixtla, Tlaxcala, México. C. P. 90120.

*Autor para correspondencia: ehernandez@chapingo.mx

ABSTRACT

Objective: the physical and chemical properties and microbial respiration of a tepetate were evaluated during the rainy and dry seasons, where ditch-edge conservation works were established as a rehabilitation strategy, to determine its soil quality.

Design/methodology/approach: study sites: bare rock without vegetation, bare rock with ditches, and remaining forest soil (control). At each site, a systematic sampling plot was established in an area of 625 m² to sample soil during the rainy and dry seasons. The data were analyzed using a completely randomized experimental design with a 3 x 2 factorial arrangement. A principal component analysis (PCA) was performed to determine the degree of association of soil properties with sites by period

Results: the bulk density in tepetates with trench edges was 1.26 and 1.21 g cm⁻³ in the dry and rainy seasons, respectively, with neutral pH, low organic matter, and cation exchange capacity. High concentrations of calcium, magnesium, potassium, and sodium, with a slight increase in phosphorus and inorganic nitrogen in the rainy season. CP1, with 47%, explains most of the variability in the data, CP2 with 27%, and CP3 with 14%.

Limitations on study/implications: Rehabilitated tepetates may require several years to show significant changes compared to sites without intervention.

*Capítulo enviado a la Revista Agro Productividad. Estatus: enviado

Findings/conclusions: three years after establishing the conservation trench work, together with the presence of herbaceous plants and grasses, positive changes are evident, more noticeable during the rainy season. The ACP identified bulk density, organic matter, cation exchange capacity, calcium, and clay content influence soil quality; so, these variables can be monitored to evaluate soil quality.

Keywords: Soil degradation, soil conservation works, physicochemical properties, volcanic soil.

RESUMEN

Objetivo: se evaluaron las propiedades físicas, químicas y respiración microbiana en periodo de lluvia y seca de un tepetate en donde fueron establecidas obras de conservación zanja bordo como estrategia de rehabilitación, para determinar su calidad edáfica.

Diseño/metodología/aproximación: los sitios de estudio fueron: tepetate sin vegetación, tepetate con zanjas bordo y suelo de relictos de bosque (testigo). En cada sitio se trazó un muestreo sistemático en un área de 625 m² para recolectar muestras de suelo en el periodo de lluvia y seca. Los datos se analizaron bajo un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 3 x 2. Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para determinar el grado de asociación de las propiedades del suelo con los sitios por periodo.

Resultados: la densidad aparente en tepetates con zanja bordo fue de 1.26 y 1.21 g cm⁻³ en el periodo de seca y lluvia, respectivamente, pH neutro, baja materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico. Concentraciones altas de calcio, magnesio, potasio y sodio, un ligero incremento en fósforo y nitrógeno inorgánico en el periodo de lluvias. El CP1 con el 47% explica la mayor parte de la variabilidad de los datos, el CP2 con el 27% y el CP3 con el 14%.

Limitaciones del estudio/implicaciones: los tepetates rehabilitados pueden tardar varios años en mostrar cambios significativos en comparación con los sitios sin intervención.

Hallazgos/conclusiones: A tres años de establecer la obra de conservación zanja bordo y junto con la presencia de herbáceas y pastos se presentan cambios positivos, siendo más notorio en la época de lluvia. El ACP permitió identificar que la densidad aparente, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, calcio y contenido de arcilla influyen en la calidad edáfica de los suelos, estas variables se pueden monitorear para evaluar dicha calidad.

Palabras clave: Degradación de suelo, obras de conservación de suelos, propiedades fisicoquímicas, suelo volcánico.

INTRODUCCIÓN

La calidad edáfica es fundamental para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, ya que determina la capacidad del suelo para sostener funciones ecológicas esenciales y proveer servicios ecosistémicos, tal como la conservación de la biodiversidad, la productividad biológica, la regulación hídrica y el ciclado de nutrimentos (FAO, 2023). Sin embargo, la pérdida de cobertura vegetal causada por la deforestación y los incendios forestales ha dado lugar a relictos de bosque y a extensas áreas de suelo degradado, como el tepetate, el cual ha perdido en gran medida las funciones asociadas a una adecuada calidad edáfica (SEMARNAT, 2018).

Los tepetates se caracterizan por su baja porosidad, escasa materia orgánica y alta compactación, por lo que se dificulta el desarrollo radical y la infiltración del agua (Velázquez-Rodríguez *et al.*, 2022), su rehabilitación es un desafío, no obstante, se han implementado diferentes acciones, tal como, la roturación, nivelación, construcción de terrazas, surcos en contorno, rotación de cultivos, incorporación de materia orgánica y fertilizantes, todo para mejorar su calidad (Comisión Nacional Forestal, 2023). Sin embargo, una de las obras de conservación de suelos que han tenido éxito en su rehabilitación son las zanjas bordo, las cuales favorecen la retención de humedad y con ello el establecimiento de vegetación nativa; sin embargo, inducen cambios en la composición florística, pero ayudan a fijar y proteger los bordos (Reyes Carrillo *et al.*, 2019; García Gallegos *et al.*, 2023). Doria Treviño *et al.* (2022) menciona que a tres años de establecer zanja bordo como obra de conservación de suelo se tuvo una mayor infiltración de agua en el suelo, así como un incremento en el contenido de materia orgánica a través del establecimiento de biomasa aérea y radicular de especies anuales. Una manera de conocer el estado de rehabilitación del tepetate es a través de la determinación de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Quisimalin *et al.*, 2024), lo que es fundamental para evaluar su potencial de uso agrícola o forestal.

En el estado de Tlaxcala se reconoce que el 93.7% de su superficie está erosionada en diferente grado, siendo una de las principales causas la erosión y el aprovechamiento del recurso suelo (Alvarado Cardona *et al.*, 2007), particularmente en el cerro de San Gregorio dentro de la comunidad de San Diego Metepec, Tlaxcala, se observa una importante degradación del ecosistema, debido principalmente a la pérdida de la vegetación nativa y por actividades antrópicas, lo que ha ocasionado la pérdida de este recurso y la exposición de tepetates (García Zepeda & López Corral, 2012), lo que se observa en diversos sitios dentro del cerro. Sin embargo, aún se cuenta con un área importante de bosque, que si no se llevan a cabo acciones de conservación puede desaparecer en un futuro (García Gallegos & Hernández-Acosta, 2024).

Por lo anterior, se plantearon los siguientes objetivos: 1) evaluar la calidad edáfica de un tepetate sin vegetación, tepetate rehabilitado con zanjas bordo y un suelo de relictos de bosque a través de la determinación de sus propiedades físicas, químicas y respiración microbiana en el periodo de lluvia y seca, para identificar los cambios

asociados al establecimiento de las obras de conservación; y 2) relacionar las variables edáficas por sitio y periodo a través de un análisis de componentes principales para identificar los indicadores más relevantes de la calidad edáfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se encuentra en una sección comunal del cerro de San Gregorio de la comunidad de San Diego Metepec, localizado al sur del municipio de Tlaxcala, lugar importante para la región, originalmente caracterizado por su valioso ecosistema de bosques de *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus* y *Cupressus*. Sin embargo, décadas de degradación por erosión acelerada, pérdida de cobertura vegetal y cambios de uso de suelo han comprometido significativamente su capacidad para proveer servicios ecosistémicos. Se ubica en las coordenadas geográficas 19°16'47.443" N y 98°15'25.574" O, a una altitud de 2 340 m s. n. m.

El orden de suelo dominante es Cambisol, suelo joven poco desarrollado con cambios evidentes en la estructura, color y contenido de arcilla. El uso de suelo es principalmente para agricultura de temporal. La precipitación media anual es de 700 a 800 mm, el clima es templado subhúmedo y la temperatura media anual de 14 °C (INEGI, 2010).

Dentro de la sección comunal fueron seleccionados tres sitios, 1) tepetate con ausencia total de vegetación, el cual ocupa una superficie de 2 070.02 m²; 2) sitio en donde se establecieron las obras de conservación zanjas bordo y sobre el bordo el establecimiento de *Pinus leiophylla* y *Cupressus lusitanica* en un área de 1 895.98 m² en el año 2021 como parte de la estrategia de rehabilitación del tepetate, en época de lluvia con la captación de humedad se observa la presencia de herbáceas y pastos sobre el bordo y entre zanjas, predominantemente de las familias Asteraceae y Poaceae, y 3) un suelo de relicto de bosque, el cual comprende una superficie de 39 194.70 m², en donde existe un predominio de *Pinus*, *Cupresus* y *Juniperus* (Figura 1), además de plantas de la familia Asteraceae, Cactaceae, Lamiaceae, Pteridaceae y Rubiaceae.

Muestreo y preparación de muestras

En cada sitio se trazó un muestreo sistemático de acuerdo con Schweizer (2011) en un área de 625 m² para llevar a cabo la recolecta de muestras tanto en el periodo de lluvia (octubre, 2024) como en seca (febrero, 2025) (Figura 1). En el sitio con obras de conservación para la rehabilitación de tepetate fueron seleccionadas al azar cinco zanjas bordo, la muestra del sustrato se tomó en el bordo. En los tres sitios se tomaron cinco muestras simples al azar a una profundidad de 0-20 cm. Todo de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002). Cada muestra se secó a temperatura ambiente y a la sombra sobre papel Kraft,

posteriormente se tamizó con malla 2 mm de diámetro para obtener un tamaño de partícula homogéneo.

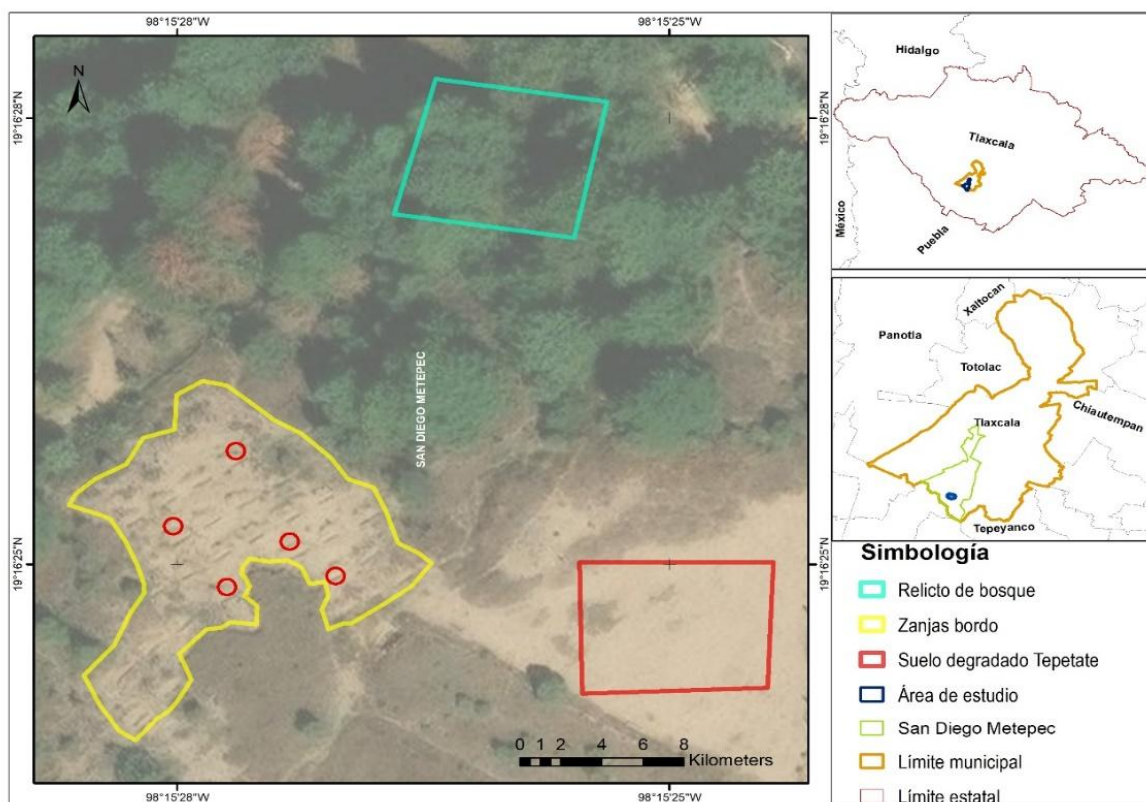


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo dentro del cerro de San Gregorio, comunidad de San Diego Metepec, Tlaxcala. Elaboración propia con información de INEGI.

Análisis edáficos

A cada muestra se le determinó la densidad aparente, densidad real, textura, porosidad, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, calcio, magnesio, potasio, sodio, capacidad de intercambio catiónico, fósforo extractable y nitrógeno inorgánico, como lo especifica la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002). La respiración microbiana se determinó a través de la incubación en medio cerrado (CO_2) de acuerdo con Paolini Gómez (2018).

Análisis de los datos

Los datos se analizaron bajo un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 3 x 2, como primer factor el sitio (tepetate sin vegetación, tepetate con zanjas bordo y suelo de relicto de bosque) y segundo factor el periodo (lluvia y seca). En total 6 tratamientos con 5 repeticiones cada uno. Los datos se sometieron

a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$), posteriormente se aplicó un análisis de varianza y una comparación de medias bajo el método Tukey ($p < 0.05$). El modelo lineal estadístico empleado para analizar los datos fue por la ecuación 1.

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} =variable respuesta, μ =media general, A_i =efecto del factor sitio, B_j =efecto del factor periodo, $(AB)_{ij}$ =interacción sitio x periodo y ε_{ijk} =error experimental.

Los datos de respiración microbiana no cumplieron el supuesto de normalidad, por lo que se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($p < 0.05$), posterior se aplicó la prueba de Dunn ($p < 0.05$) para identificar que pares de grupos específicos tienen diferencias significativas entre sí. Finalmente, se realizó un análisis de correlación de Pearson y de componentes principales (ACP) para determinar el grado de asociación de las propiedades del suelo con los sitios por periodo. Todo lo anterior con el empleo del software estadístico InfoStat versión libre 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020).

RESULTADOS

Propiedades edáficas

El análisis de varianza mostró que el factor sitio es significativamente diferente ($p < 0.05$) para la mayoría de las variables, excepto para limo, arena y potasio. En el factor periodo se tuvieron diferencias significativas en arcilla, arena, magnesio, fósforo y nitrógeno. La interacción de los factores fue significativa ($p < 0.05$) para magnesio y nitrógeno.

Dentro de las propiedades físicas, la densidad real presentó un valor mayor en tepetate en periodo de lluvia (2.62 g cm^{-3}) y fue significativo ($p < 0.05$) (Cuadro 1); mientras que, los valores más bajos corresponden al suelo de relicto de bosque en el periodo de seca (2.38 g cm^{-3}), respecto al sitio con tepetate sin vegetación y al sitio con las obras de conservación zanjas bordo, en ambos periodos. Por otro lado, la densidad aparente en el tepetate sin vegetación en el periodo de lluvia y con zanjas bordo en ambos periodos fue significativamente mayor ($p < 0.05$) y con valores mayores a 1 g cm^{-3} que indica la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002) para suelos volcánicos, respecto al suelo de relicto de bosque. En cuanto al porcentaje de porosidad fue significativamente mayor ($p < 0.05$) en el suelo de relicto de bosque, en relación con el tepetate sin vegetación y al tepetate con zanjas bordo, tanto en el periodo de lluvia como en seca, respectivamente.

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas en los tres sitios bajo estudio en el periodo de lluvia y seca.

Propiedades	Tepetate con zanja bordo		Tepetate sin vegetación		Suelo de relicto de bosque	
	Lluvia	Seca	Lluvia	Seca	Lluvia	Seca
DR (g cm ⁻³)	2.57 a	2.49 a	2.62 a	2.59 a	2.45 b	2.38 b
DA (g cm ⁻³)	1.21 a	1.26 a	1.21 a	1.15 a	0.97 b	1.09 a
Porosidad (%)	53.14 a	49.31 b	53.76 a	55.63 a	60.42 a	54.3 a
Arcilla (%)	12.00 a	6.95 b	10.07 b	4.95 b	17.11 a	12.08 a
Limo (%)	20.36 a	18.00 a	23.49 a	19.6 a	17.85 a	19.6 a
Arena (%)	67.64 a	75.05 a	66.44 b	75.45 a	65.04 b	68.32 a
pH	6.73 a	6.48 a	5.82 c	5.81 c	6.37 a	6.25 b
CE (dS m ⁻¹)	0.02 b	0.04 b	0.27 a	0.26 a	0.07 b	0.11 b
MO (%)	1.28 b	1.30 b	0.69 b	1.52 b	8.34 a	6.72 a
CIC [Cmol(+) kg ⁻¹]	10.01 b	7.78 b	11.68 b	11.51 b	18.52 a	13.37 a
Calcio (mg kg ⁻¹)	1232 b	1254.63 b	1234.18 b	1336.15 b	3285.52 a	2677.1 a
Magnesio (mg kg ⁻¹)	1702.01 a	1075.87 b	1852.92 a	1933.25 a	1771.35 a	1681.84 a
Potasio (mg kg ⁻¹)	452 a	386.4 a	509.87 a	358.40 a	562.40 a	568.40 a
Sodio (mg kg ⁻¹)	83.6 a	66.8 a	61.87 a	58.8 a	20.40 b	19.20 b
Fósforo (mg kg ⁻¹)	19.84 b	5.63 d	20.44 b	7.03 d	25.68 a	10.17 c
N inorg. (mg kg ⁻¹)	0.78 b	0.13 c	2.50 a	0.07 c	0.60 b	0.35 b

Letras distintas en cada fila indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$). DR=Densidad real, DA=Densidad aparente, CE=Conductividad eléctrica, MO=Materia orgánica, CIC=Capacidad de Intercambio Catiónico.

En el tepetate sin vegetación como en el suelo de relicto de bosque existe un predominio de la fracción arena, se observa en el periodo de seca un contenido significativo ($p < 0.05$), respecto al periodo de lluvia. En el tepetate con zanja bordo se presentó un incremento significativo tanto en lluvia como en seca. En cuanto al porcentaje de arcilla se tuvieron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$), se

registraron los valores más altos en el suelo de relicto de bosque en los dos periodos y en el tepetate con zanjas bordo en el periodo de lluvias se tuvo un valor significativo.

El pH fue de moderadamente ácido a neutro de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002) en los sitios analizados. En el tepetate con zanjas bordo en los dos periodos se presentó un valor significativamente mayor ($p < 0.05$), clasificado como neutro (6.6-7.3), al igual que en el suelo de relicto de bosque en lluvia; mientras que, en el tepetate sin vegetación fue moderadamente ácido (5.1-6.5). La conductividad eléctrica mostró diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$), el tepetate sin vegetación en ambos periodos presentó valores significativos ($p < 0.05$); mientras que, en el tepetate con zanjas bordo y en el suelo con relicto de bosque en ambos periodos se tuvo un decremento. La normatividad mexicana señala que un valor $< 1 \text{ dS m}^{-1}$ significa que no existen efectos por acumulación de sales.

La materia orgánica en el suelo de relicto de bosque presentó un valor significativo ($p < 0.05$) en ambos periodos, la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002) indica que un valor entre 6.1 y 10.9 % se clasifican como medio; respecto al tepetate con zanjas bordo y al tepetate sin vegetación, el contenido de materia orgánica se clasifica como muy bajo ($< 4\%$). De la misma manera en el suelo de relicto de bosque y en ambos periodos se tuvo la mayor capacidad de intercambio catiónico, siendo significativa ($p < 0.05$) y considerada media [$15\text{-}25 \text{ Cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$] en el periodo de lluvia y baja [$5\text{-}15 \text{ Cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$] en seca, así como en el tepetate sin vegetación y en el tepetate con zanjas bordo.

Respecto al contenido nutrimental, el calcio tuvo un valor significativamente mayor ($p < 0.05$) en el suelo de relicto de bosque en ambos periodos, clasificándose como rico ($2500\text{-}5000 \text{ mg kg}^{-1}$) y en los tepetates en sus dos condiciones las cantidades fueron medianas ($1000\text{-}2500 \text{ mg kg}^{-1}$). En cuanto al magnesio, las concentraciones se clasifican como muy ricas ($> 120 \text{ mg kg}^{-1}$), este nutrimento mostró valores significativos en ambos periodos ($p < 0.05$) en el suelo de relicto de bosque y en el tepetate sin vegetación, excepto en el tepetate con zanjas bordo que fue en el periodo de seca. El potasio si bien no mostró diferencias significativas ($p < 0.05$), se presenta un incremento en el suelo de relicto de bosque, mostrando concentraciones muy ricas ($> 320 \text{ mg kg}^{-1}$), concentraciones de acuerdo con la clasificación propuesta por Vázquez (1997).

El sodio, en el tepetate sin vegetación y con zanjas bordo se tuvieron en ambos periodos valores significativos ($p < 0.05$), respecto al suelo de relicto de bosque. El contenido de fósforo en el periodo de lluvias en el suelo de relicto de bosque fue significativo ($p < 0.05$), de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002) el valor se clasifica como medio ($15\text{-}30 \text{ mg kg}^{-1}$), al igual que en el tepetate sin vegetación y con zanja bordo. El nitrógeno inorgánico en todos los casos es muy bajo ($0\text{-}10 \text{ mg kg}^{-1}$) de acuerdo con lo que establece la normatividad mexicana; sin embargo, en el tepetate sin vegetación se tuvo un valor significativo ($p < 0.05$)

durante las lluvias, respecto al tepetate con zanjas bordo y al suelo de relicto de bosque en ambos periodos.

La respiración microbiana determinada a través del contenido de C-CO₂ no presentó diferencias estadísticamente significativas de acuerdo con las medianas ($p < 0.05$); pero se observa que los valores más altos se presentaron en el tepetate sin vegetación durante el periodo de lluvias, seguido del suelo relicto de bosque y en el tepetate con zanjas bordo y en el periodo de seca en el suelo de relicto de bosque (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores de medianas de la respiración microbiana en los tres sitios bajo estudio por periodo.

Sitios	Periodo	Respiración microbiana (mg C-CO ₂ kg ⁻¹ suelo día ⁻¹)
Tepetate con zanjas bordo	Lluvia	7.3
Tepetate sin vegetación		14.6
Suelo de relicto de bosque		11
Tepetate con zanjas bordo	Seca	11
Tepetate sin vegetación		11
Suelo de relicto de bosque		14.6

Relación de las propiedades del suelo

Con el análisis de correlación se obtuvo que la densidad aparente fue la variable que presentó más interacciones significativas y negativas, destaca la capacidad de intercambio catiónico ($r = -0.97$), porosidad ($r = -0.92$), materia orgánica ($r = -0.92$) y el calcio ($r = -0.94$). La porosidad correlacionó de manera positiva con la capacidad de intercambio catiónico ($r = 0.95$). El contenido de arena significativo y negativo con el contenido de fósforo ($r = -0.90$). El pH con la conductividad eléctrica ($r = -0.98$). La materia orgánica con el contenido de sodio ($r = -0.93$) y este a su vez con el calcio, también con una $r = -0.93$.

De acuerdo con el análisis de componentes principales, las diferentes variables se agruparon en tres componentes, todos con un valor propio > 1 , los cuales en conjunto explicaron el 89% de la variabilidad total del sistema, el CP1 con el 47% explica la mayor parte de la variabilidad, el CP2 con el 27% y el CP3 con el 14% aporta información complementaria (Cuadro 3).

Cuadro 3. Proporción de la variación explicada por cada componente principal.

Componente	Valor	% Varianza total	% Varianza acumulada
1	8.07	0.47	0.47
2	4.61	0.27	0.75
3	2.39	0.14	0.89

Variable	Autovectores		
	CP1	CP2	CP3
Densidad real	-0.21	0.34	0.06
Densidad aparente	-0.33	0.01	0.19
Porosidad	0.29	0.15	-0.19
Arcilla	0.31	0.01	0.29
Limo	-0.09	0.39	0.15
Arena	-0.26	-0.18	-0.35
pH	0.05	-0.28	0.44
Conductividad eléctrica	-0.07	0.34	-0.37
Materia orgánica	0.33	-0.14	-0.10
Calcio	0.34	-0.12	-0.10
Magnesio	0.13	0.37	0.18
Potasio	0.30	0.05	0.18
Sodio	-0.29	0.10	0.25
Capacidad de Intercambio Catiónico	0.33	0.08	-0.13
Fósforo	0.22	0.23	0.34
Nitrógeno inorgánico	-0.001	0.36	0.28
Respiración microbiana	-0.07	-0.32	0.05

El CP1 se explica por la densidad aparente, la capacidad de intercambio catiónico, calcio, arcilla y materia orgánica, lo que indica que el componente orgánico tiene una relación con el componente físico y nutrimental. El CP2 está explicado por la densidad real, las partículas de limo, la conductividad eléctrica, el contenido de magnesio, nitrógeno inorgánico y la respiración microbiana, componente que resume la influencia del componente físico y nutrimental con la actividad biológica. El CP3 está ligado al contenido de arena, pH, conductividad eléctrica y fósforo.

DISCUSIÓN

Propiedades edáficas

Los suelos volcánicos presentan características físicas que favorecen una adecuada estabilidad estructural e importante resistencia a la degradación. Sin embargo, estas se ven afectadas por las actividades antrópicas, tal es el caso de la densidad real y aparente del suelo, los valores obtenidos de densidad real tanto en el suelo de relicto de bosque como en tepetates fueron menores a lo que establece la FAO (2025) de 2.65 g cm^{-3} , esto significa una ausencia de materiales altamente densos (Tolimir *et al.*, 2020). Por otro lado, los valores de densidad aparente se asocian a un alto contenido de materia orgánica, principalmente en el suelo de relicto de bosque para ambos periodos (Semarnat, 2002). Pérez Hernández *et al.* (2023) reportaron que en suelos conservados de clima templado con bosque de pino-encino por 50 años, la densidad aparente fue de 0.32 g cm^{-3} y en suelos con reciente intervención, en donde se eliminó la totalidad de la vegetación existió un

aumento de la densidad aparente (0.62 g cm^{-3}), por lo que esta propiedad puede incrementarse a corto plazo si no se llevan a cabo acciones de conservación del suelo.

En los tepetates bajo estudio la densidad aparente fue menor a lo que reportan Gama-Castro *et al.* (2007) de 1.70 a 1.96 g cm^{-3} para materiales endurecidos como el tepetate, lo que repercutió en la porosidad, se tuvieron valores satisfactorios (50-55%) de acuerdo a Kaurichev (1984) citado por Jaramillo (2002), pero inferiores a lo reportado para suelos perturbados en Tlaxcala (42.6–44.4 %) por García Gallegos & Hernández Acosta (2024), con esto se puede inferir que se tiene a tres años de establecer las obras de conservación una mejora en las condiciones físicas del tepetate, por el establecimiento de la vegetación. Respecto a la proporción de partículas, el porcentaje de arena en tepetates y en el suelo de relicto de bosque fue mayor. Feifel *et al.* (2024) mencionan que, en suelos donde predomina la fracción arena se tendrá un aumento en la capacidad de retención de agua en capas superficiales, pero implica una mayor evaporación, y disminución en la disponibilidad hídrica, limitando el crecimiento de la vegetación.

De acuerdo con las propiedades químicas, los valores de pH obtenidos indicaron condiciones favorables para la disponibilidad de nutrientes como señala Estrada-Herrera *et al.* (2017) quienes reportaron un pH de 5.7 a 7.2 en suelos de relicto de bosque y degradado, respectivamente. La acidez se asocia a la descomposición de la materia orgánica y a la liberación de ácidos orgánicos (Hong *et al.*, 2019); mientras que, un incremento del pH en el periodo de lluvias refleja un efecto amortiguador dado por la humedad presente en el suelo (Manirakiza *et al.*, 2025). La conductividad eléctrica en el tepetate sin vegetación en ambos periodos coincide con lo reportado por Navarro-Garza *et al.* (2004) en tepetates del oriente de Tlaxcala de 0.29 dS m^{-1} , considerada baja y aún valores inferiores en el tepetate con zanja bordo y en el suelo de relicto de bosque bajo estudio.

En cuanto al contenido de materia orgánica en los tepetates fue mayor de lo que registraron Munive-Martínez *et al.* (2018) de 0.30% para un tepetate de Atlangatepec, Tlaxcala. En contraste, en el suelo de relicto de bosque el porcentaje de materia orgánica fue superior, propio de suelos de bosque. Cairo Cairo *et al.* (2018) mencionan que la materia orgánica está relacionada con la disponibilidad de residuos vegetales. La capacidad de intercambio catiónico en este mismo suelo al igual fue mayor, la acumulación de hojarasca, la formación de complejos órgano-minerales y la actividad biológica generan suelos con mayor capacidad de cambio y disponibilidad de bases intercambiables, como lo mencionan Nsengimana *et al.* (2024).

Las altas concentraciones de calcio, magnesio y potasio en los tres sitios se deben al material volcánico que le da origen al suelo del área, rico en feldespatos y otros minerales ricos en calcio, magnesio y potasio, particularmente el magnesio se incrementa por la presencia de minerales ferromagnesianos o feldespatos ricos en este elemento (Rodríguez-Valdivia *et al.*, 2021). En otras áreas dentro del estado de Tlaxcala se reportan concentraciones menores a las encontradas en este

estudio, Munive-Martínez *et al.* (2018) en tepetate sin vegetación reportaron un contenido de potasio de 2.15 mg kg^{-1} , calcio de 13.63 mg kg^{-1} y magnesio de 7.90 mg kg^{-1} . García Gallegos *et al.* (2023) en tepetates con zanja bordo establecidas en el año 2012 obtuvieron $1\,510 \text{ mg kg}^{-1}$ de calcio, 288 mg kg^{-1} de magnesio y 156 mg kg^{-1} de potasio, pero en el caso del sodio fue de $5\,370.5 \text{ mg kg}^{-1}$, valor muy por encima de lo obtenido en los tepetates bajo estudio.

En cambio, los altos valores de fósforo en el suelo de relicto de bosque pueden deberse al mayor aporte de hojarasca y residuos vegetales, lo que libera nutrimentos a través de su descomposición, como lo menciona Lemanowicz (2018). Pero en tepetates, García Gallegos & Hernández Acosta (2024) obtuvieron un promedio de fósforo de 37.2 mg kg^{-1} en suelos degradados en donde aflora el tepetate en algunos sitios dentro del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala en periodo de seca, valor superior a las concentraciones de los sitios de estudio con tepetate en ambos periodos.

En cuanto al contenido de nitrógeno inorgánico, este fue bajo en el suelo de relicto de bosque y en los tepetates. Febles-Díaz *et al.* (2023) refieren que esto puede deberse al origen geológico, los tepetates al no rehabilitarse tienen una baja disponibilidad de este elemento, lo que se traduce en un crecimiento deficiente de las plantas y a una falta de nutrimentos esenciales. Por lo que a tres años de haber establecido las zanjas bordo aún no existe un aumento significativo de fósforo y nitrógeno, lo que se refleja en el componente biológico, la respiración microbiana fue menor, respecto a lo que reportaron García Gallegos *et al.* (2023) para suelos rehabilitados con zanjas bordo en los años 2012 y 2015 con 23.3 y $23.7 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ suelo, respectivamente. Álvares-Solís *et al.* (2000) para tepetates mencionan que la incorporación de residuos orgánicos y el establecimiento de plantas por su efecto positivo para la actividad microbiana, contribuyen al proceso de habilitación de este sustrato.

Relación de las propiedades del suelo

La densidad aparente correlacionó de forma negativa con la porosidad, materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de calcio; lo que significa que, si disminuye la densidad aparente existirá un incremento en el espacio poroso, se tendrá mayor humificación de la materia orgánica, lo que proporcionará una mayor capacidad de cambio, dada por el humus y una mineralización que permitirá la disponibilidad de nutrimentos, lo que beneficia sin duda el establecimiento de la vegetación (Barajas Guzmán *et al.*, 2020). Por otro lado, García Gallegos & Hernández Acosta (2024) quienes de la misma manera encontraron que la densidad aparente fue la variable que tuvo el mayor número de interacciones significativas y negativas con el manganeso ($r=-0.85$), capacidad de campo ($r=-0.85$), punto de marchitez permanente ($r=0.75$) y humedad aprovechable ($r=-0.85$), lo que indicó que al existir un incremento de la densidad aparente se afectará el agua aprovechable y por lo tanto habrá una mayor compactación.

El análisis de componentes principales (ACP) (Cuadro 3) mostró que las variables con mayor peso se presentaron en el CP1, siendo la densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, la partícula de arcilla y el contenido de calcio, las cuales presentaron correlaciones negativas. Rosero *et al.* (2019) reportaron que, en suelos de bosque, pradera y en un sistema silvopastoril el CP1 explicó el 48.48% de la variabilidad total y determinada por la capacidad de intercambio catiónico, calcio; mientras que el, CP2 con el 21.69% por la fracción arena, arcilla, el pH y N total, lo que permitió identificar que estas propiedades edáficas influyen de manera significativa en la calidad del suelo. García Gallegos *et al.* (2023) con el establecimiento de las obras de conservación zanjas bordo para la rehabilitación de tepetates, obtuvieron que el CP1 con el 52.1% tuvo la mayor variabilidad total de los datos y es explicado por la capacidad de intercambio catiónico, calcio, carbono orgánico y la materia orgánica, el CP2 con el 22.4% determinado por la fracción arena, arcilla, pH y N total, lo que difiere con lo obtenido en este estudio, de ahí que las variables del suelo están en función de las condiciones específicas de cada sitio de estudio y del tiempo de establecimiento de las obras de conservación.

Reyes Carrillo *et al.* (2019) mencionan que la construcción de zanjas bordo incrementa la captación de agua en el periodo de lluvias y con ello el establecimiento de vegetación, las herbáceas y pastos se establecen en primera instancia, lo que se observó en el sitio bajo estudio a tres años de haber rehabilitado los tepetates con las zanjas bordo, lo que coincide con Doria Treviño *et al.* (2022) quienes mencionaron que a tres años de establecer obras de conservación de suelo no se presentó una mejoría significativa en la funcionalidad del ecosistema, se observó una cobertura de herbáceas en la obra de conservación, lo que favorecerá la retención de humedad y un incremento en la acumulación de materia orgánica.

CONCLUSIONES

A tres años de establecer la obra de conservación zanja bordo y junto con la presencia de herbáceas y pastos se presentan cambios positivos, principalmente en el contenido de materia orgánica y fósforo, siendo más notorio en la época de lluvia cuando existe un aumento de humedad.

Con el análisis de componentes principales se identificó que la densidad aparente, la capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, la proporción de arcilla y el contenido de calcio son propiedades que intervienen en la calidad edáfica en los sitios de estudio, por lo que estas variables se pueden evaluar para identificar la calidad tanto del suelo de relicto de bosque como de los tepetates en el cerro de San Gregorio, Metepec, Tlaxcala.

AGRADECIMIENTOS

Se hace un amplio reconocimiento a la asociación civil Tlalli Atoktli de la comunidad de San Diego Metepec, Tlaxcala por su apoyo para llevar a cabo esta investigación,

así como a la SECIHTI por otorgar la beca que permitió realizar los estudios de maestría de Ana Rosario Velasco Sánchez.

REFERENCIAS

- Alvarado Cardona, M., Colmenero Robles, J. A., & Valderrábano Almegua, M. D. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 14(3): 317-326. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10414309>
- Álvarez-Solís, J. D., Ferrera-Cerrato, R., & Etchevers-Barra, J. D. (2000). Actividad microbiana en tepetate con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia*, 34: 523-532. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30234501>
- Barajas Guzmán, G., Hernández Rosales, D. C., Paredes García, S., Peña Becerril, J. C., & 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. doi: 10.29298/rmcf.v11i57.552.
- Cairo Cairo, P., Alvares Alonso, O., Year Yera, Y., Rodríguez Urrutia, A., Mollineda, Á., Torres Artiles, P., & Rodríguez López, O. (2018). La biomasa de *Bambusa vulgaris* como alternativa para la recuperación de suelos degradados. *Centro Agrícola*, 45(3): 51-58. https://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852018000300051&lng=es&tlng=pt
- Comisión Nacional Forestal. (2023). Manual de obras y prácticas de protección, restauración y conservación de suelos forestales (6ª edición). México. 256 p. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/910650/_Manual_de_Obras_y_Prcticas_de_Protecci_n__Restauraci_n_y_Conservaci_n_....pdf
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). InfoStat, versión 2020, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Doria Treviño, O. A., Mendoza Aguilar, D. O., Gutiérrez Gutiérrez, M., & Pando-Moreno, M. (2021). Efecto de una obra de conservación de suelo en el patrón de distribución de la vegetación y funcionalidad del ecosistema. *E-CUCBA*, (17): 229–237. doi.org/10.32870/ecucba.vi17.230
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51: 813-831. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n8/1405-3195-agro-51-08-813.pdf>

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2023). AGROVOC. https://agrovoc.fao.org/browse/agrovoc/en/page/c_a9645d28
- FAO (Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura). (2025). Propiedades físicas del suelo. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Febles-Díaz, J. M., González-Calvo, T., Rodríguez-Soto, C., Baró-Suárez, J. E., Balderas-Plata, M. A., Febles González, J. C. M., & García Velasco, E. (2023). Geochemical survey of soil nitrogen and phosphorus in Valle De Bravo-Amanalco basin, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 127: e104393. doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104393
- Feifel, M., Durner, W., Hohenbrink, T. L., & Peters, A. (2024). Effects of improved water retention by increased soil organic matter on the water balance of arable soils: A numerical analysis. *Vadose Zone Journal*, 23: e20302. doi.org/10.1002/VZJ2.20302
- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., & 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*, LIX(1): 133-145. doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a11
- García Gallegos, E., & Hernández Acosta, E. (2024). Indicadores de calidad para suelos forestales dentro de un Área Natural Protegida. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(85): 27–47. doi.org/10.29298/rmcf.v15i85.1467
- García Gallegos, E., Vázquez Cuecuecha, O. G., Guerra De la Cruz, V., & Cocoltzi Pérez, F. J. (2023). Evaluación del efecto de obras de conservación en suelos forestales de Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(78): 34-57. doi.org/10.29298/rmcf.v14i78
- García Zepeda, O., & López Corral, A. (2012). Un reservorio de agua del posclásico en el cerro San Gregorio, Tlaxcala. En: Sánchez Mastranzo, N. A., & Mendoza Santos, R. J. (Coord.). *Memorias de las Jornadas de Antropología e Historia 2012*. Centro INAH Tlaxcala, Tlaxcala, México. 1-7 p.
- Hong, S., Gan, P., & Chen, A. (2019). Environmental controls on soil pH in planted forest and its response to nitrogen deposition. *Environmental Research*, 172: 159–165. doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.020
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010. Tlaxcala, Tlaxcala. Clave geoestadística 29033. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/29/29033.pdf

- Jaramillo, J. D. F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70085>
- Lemanowicz, J. (2018). Dynamics of phosphorus content and the activity of phosphatase in forest soil in the sustained nitrogen compounds emissions zone. *Environmental Science and Pollution Research*, 25: 33773-33782. doi.org/10.1007/s11356-018-3348-5
- Manirakiza, N., Melkani, S., Rabbany, A., Medina-Irizarry, N., Smidt, S., Braswell, A., Martens-Habbena, W., & Bhadha, J. H. (2025). Responses of soil health to seasonal change under different land cover types in a sub-tropical preserve ecosystem. *PLoS ONE*, 20(3): e0318092. doi.org/10.1371/journal.pone.0318092
- Munive Martínez, C., Vázquez Cuecuecha, O., Zamora Campos, E., López López, A., Calvario Rivera, C. I., & García Gallegos, E. (2018). La importancia de rehabilitar tepetate con *Lupinus campestris* Cham. & Schltld. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 6(2): 2097-2103. doi.org/10.47808/revistabioagro.v6i2.Especial.256
- Navarro-Garza, H., Pérez-Olvera, A., Flores-Sánchez, D. (2004). Productividad del tepetate con sistemas rotacionales. *Terra Latinoamericana*, 22 (1), 71-79. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311208008>
- Nsengimana, V., Mukangango, M., Habiyaemye, J. de D., Uwiduhaye, F., Iradukunda, C. S., Bigengimana, Y., & Nsanganwimana, F. (2024). Status of soil physicochemical properties in forests and savannas restored using the ecosystem-based adaptation approach in Eastern Rwanda. *Applied and Environmental Soil Science*, 2024 (1): 6504201 doi.org/10.1155/2024/6504201
- Paolini Gómez, J. E. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Revista Terra Latinoamericana*, 36(1): 13–22. doi.org/10.28940/terra.V36I1.257
- Pérez Hernández, J. F., Razo Zárate, R., Rodríguez Laguna, R., CapulinGrande, J., Árcega Santillán, I., Manzur Chávez, N. (2023). Efecto del manejo forestal en las características físico-hidrológicas del suelo en un bosque de clima templado. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14 (80): 54-79. doi:10.29298/rmcf.v14i80.1388.
- Quisimalin, A., Cazorla, X., Ortega, M., Quintuña, P., & Cornejo, J. (2024). Soil evaluation through quality indicators. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, 3(2): 55–71. doi.org/10.18502/espoch.v4i1.15801
- Reyes Carrillo, A., Martínez Menez, M. R., Rubio Granados, E., García Moya, E., & Exebio García, A. A. (2019). Impacto del sistema zanja bordo sobre la

- cobertura vegetal en pastizales de la región Mixteca, estado de Oaxaca. *Terra Latinoamericana*, 37(3): 231–242. doi.org/10.28940/terra.v37i3.327
- Rodríguez-Valdivia, M., Urdy-Urdy, E., & Ocharán-Velásquez, G. (2021). Evaluation of the cation Exchange capacity, CEC, of natural zeolite or zeolite exchanged with sodium from ignimbritic formation in puno, Peru, by measuring the removal of ammonium and heavy metals. *Revista Boliviana de Química*, 38(2): 99-103. <https://www.redalyc.org/journal/142631426368310005/html/>
- Rosero, J., Vélez, J., Burbano, H., & Ordóñez, H. (2019). Cuantificación de la respiración y biomasa microbiana en Andisoles del sur de Colombia. *Agro Sur*, 47(3):15-25. doi: 10.4206/agrosur.2019.v47n3-03.
- Schweizer, L. (2011). Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria y Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José Costa Rica. 18 p. <https://www.inag.go.cr/bibliotecavirtual/p33-9965.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre de 2002. México, D. F., México. 73 p. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2018). Suelos, sostén de la vida humana. <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/suelos-de-importancia-crucial-para-la-vida-humana-y-la-biodiversidad>
- Tolimir, M., Kresović, B., Životić, L., Dragović, S., Dragović, R., Sredojević, Z., & Gajić, B. (2020). The conversion of forestland into agricultural land without appropriate measures to conserve SOM leads to the degradation of physical and rheological soil properties. *Scientific Reports*, 10, 13668. doi.org/10.1038/s41598-020-70464-6
- Vázquez, A. A. (1997). Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo. 2ª. Edición. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 29 p.
- Velázquez-Rodríguez, A. S., Báez-Pérez, A., Hidalgo-Moreno, C., Parsa-Retana, M., Etchevers-Barra, J., & Paz-Pellat, F. (2022). Formación de suelos a partir de tepetates: unidades estructurales, carbono orgánico y estabilidad estructural. *Terra Latinoamericana*, 40: e1447. doi.org/10.28940/terra.v40i0.1447

CAPÍTULO 4. DIVERSIDAD VEGETAL EN ZANJAS-BORDO Y RELICTO DE BOSQUE BAJO CONDICIONES ESTACIONALES EN TLAXCALA, MÉXICO

Resumen

En Tlaxcala, la degradación del suelo continúa siendo un problema crítico; en este contexto, las zanjas-bordo se ha implementado como estrategia para la rehabilitación de tepetate y la recuperación de sus funciones edáficas, es importante determinar la diversidad vegetal ante el cambio estacional, y compararlos con el relictos de bosque como referencia ya que conserva su estructura, composición y procesos ecológicos cercanos a los bosques originales. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la diversidad vegetal en un relictos de bosque y en zanjas-bordo durante las temporadas de seca y lluvia, para identificar el efecto de la estacionalidad y su impacto en la rehabilitación del suelo degradado. Se realizaron dos muestreos de vegetación en temporada de lluvia y seca en zanjas-bordo y relictos de bosque para identificar las especies vegetales presentes y analizar los índices de diversidad de Simpson (1-D), Shannon-Wiener (H') y el coeficiente de similitud de Sørensen con la finalidad de calcular la diversidad alfa y beta. Los datos fueron analizados utilizando Microsoft Excel e Infostat mediante un análisis de varianza mediante un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 2 x 2. Las zanjas-bordo registraron la mayor diversidad en la temporada de lluvia (1-D=0.70, H'=1.53), mientras que el relictos de bosque presentó los valores más bajos (1-D=0.23, H'=0.40) ($p<0.05$). En temporada seca en ambos sitios mostraron valores intermedios (zanja-bordo, 1-D=0.48, H'=0.81; relictos de bosque, 1-D=0.41, H'=0.74) sin diferencias significativas ($p>0.05$). El coeficiente de similitud de Sørensen indicó que en ambos sitios no existe similitud entre las comunidades en lluvia (0.049) y seca (0.095). Ante el cambio estacional en las zanjas-bordo permanecen seis especies y en el relictos de bosque siete especies. En general, la familia Asteraceae y Poaceae permanecen, sin embargo, varias especies desaparecen y solamente quedan las especies más resistentes a la sequía.

Abstract

In Tlaxcala, soil degradation continues to be a critical problem; in this context, ditches have been implemented as a strategy for the rehabilitation of tepetate and the recovery of its edaphic functions. It is important to determine plant diversity in the face of seasonal change and compare it with the forest remnant as a reference, since it conserves its structure, composition, and ecological processes close to those of the original forests. The objective of this study was to evaluate plant diversity in a forest remnant and in ditches during the dry and rainy seasons to identify the effect of seasonality and its impact on the rehabilitation of degraded soil. Two vegetation samples were collected during both the rainy and dry seasons in ditches and forest

remnants to identify the plant species present and analyze the Simpson (1-D) and Shannon-Wiener (H') diversity indices and the Sørensen similarity coefficient in to calculate alpha and beta diversity. The data were analyzed using Microsoft Excel and Infostat through an analysis of variance using a completely randomized experimental design with a 2 x 2 factorial arrangement. The ditches exhibited greater diversity in the rainy season (1-D=0.70, H'=1.53), while the forest remnant had the lowest values (1-D=0.23, H'=0.40) ($p<0.05$). In the dry season, both sites exhibited intermediate values (roadside ditch, 1-D=0.48, H'=0.81; forest remnant, 1-D=0.41, H'=0.74) with no significant differences ($p>0.05$). Sørensen's similarity coefficient indicated that there is no similarity between the communities in the rainy season (0.049) and dry season (0.095) at both sites. In response to seasonal change, six species remain in the ditch communities and seven species in the forest remnant. In general, the Asteraceae and Poaceae families remain, however, several species disappear and only the most drought-resistant species remain.

Palabras clave: Rehabilitación de suelos, temporada de lluvia, temporada seca, índices de diversidad, Poaceae, Asteraceae.

Keywords: Soil rehabilitation, rainy season, dry season, diversity indices, Poaceae, Asteraceae.

Introducción

La diversidad vegetal es clave para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, ya que influye directamente en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Lal, 2016), además de mantener la funcionalidad ecológica a lo largo del tiempo y favorecer el establecimiento de comunidades vegetales diversas y estables (Cardoso et al., 2013), los sistemas con mayor diversidad presentan mayor resistencia a perturbaciones, mejor funcionamiento y una provisión más amplia de servicios ecosistémicos en comparación con aquellos con menor riqueza de especies (Brockhoff et al., 2017).

La diversidad vegetal no solo influye en la estabilidad y productividad del ecosistema, sino que también es fundamental en la diversidad y estructura de las comunidades microbianas del suelo, favoreciendo la estabilidad estructural y funcional del sistema edáfico (Lange et al., 2015; Shen et al., 2022). Asimismo, una cobertura vegetal diversa contribuye a reducir los procesos de degradación del

suelo, al disminuir la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica y mejorar la protección superficial (Blanco-Valdes, 2016).

La relevancia de estos procesos se hace evidente en regiones con altos niveles de degradación como el estado de Tlaxcala que registra el 93.7% de su superficie total (4 060.923 km²), con algún tipo de erosión (Alvarado Cardona et al., 2007), presentando afloramiento de tepetate que se caracteriza por tener una alta densidad, baja porosidad y fertilidad, lo que limita el establecimiento y desarrollo de la vegetación (Gama-Castro et al., 2007).

Para favorecer el establecimiento de especies vegetales principalmente herbáceas se implementan estrategias de rehabilitación como las zanjas-bordo las cuales son estructuras diseñadas para captar y retener agua de lluvia, facilitando su infiltración y reduciendo la erosión superficial (García Gallegos et al., 2023). Un referente para comparar el efecto de las prácticas de rehabilitación sobre la diversidad vegetal son los relictos de bosque que son remanentes de bosque original que conservan su estructura, composición y procesos ecológicos cercanos a los bosques originales (Jaroszewicz et al., 2019).

Para la comparación de la diversidad vegetal es importante considerar la estacionalidad ya que este demuestra su importancia en los ecosistemas ante el cambio de periodo seco y húmedo (Chávez Durán et al., 2014), además que este cambio estacional puede provocar la pérdida rápida de riqueza y diversidad funcional, favoreciendo especies con la capacidad de tolerancia ante estrés hídrico, prevaleciendo algunas especies de la familia Poaceae y Asteraceae (Reynaert et al., 2021).

El presente estudio evaluó la diversidad vegetal en un relicto de bosque y en zanjas-bordo durante las temporadas de seca y lluvia, para identificar el efecto de la estacionalidad y su impacto en la rehabilitación del suelo degradado.

Materiales y métodos

El área de estudio se localiza en El Cerro de San Gregorio, San Diego Metepec, Tlaxcala con coordenadas 19°16'26" N, 98°15'28" W, a una altitud de 2,343 msnm. Está integrada por dos sitios (Figura 1). El primero es suelo en proceso de rehabilitación con una superficie de 1,895.98 m², donde se establecieron 27 zanjas-bordo en octubre de 2021, cada una con dimensiones de 2.64 m × 0.68 m × 0.32 m. El segundo es un relicto de bosque y comprende una superficie de 39,194.70 m²; presenta principalmente vegetación arbórea de *Pinus leiophylla* y *Cupressus lusitanica*.

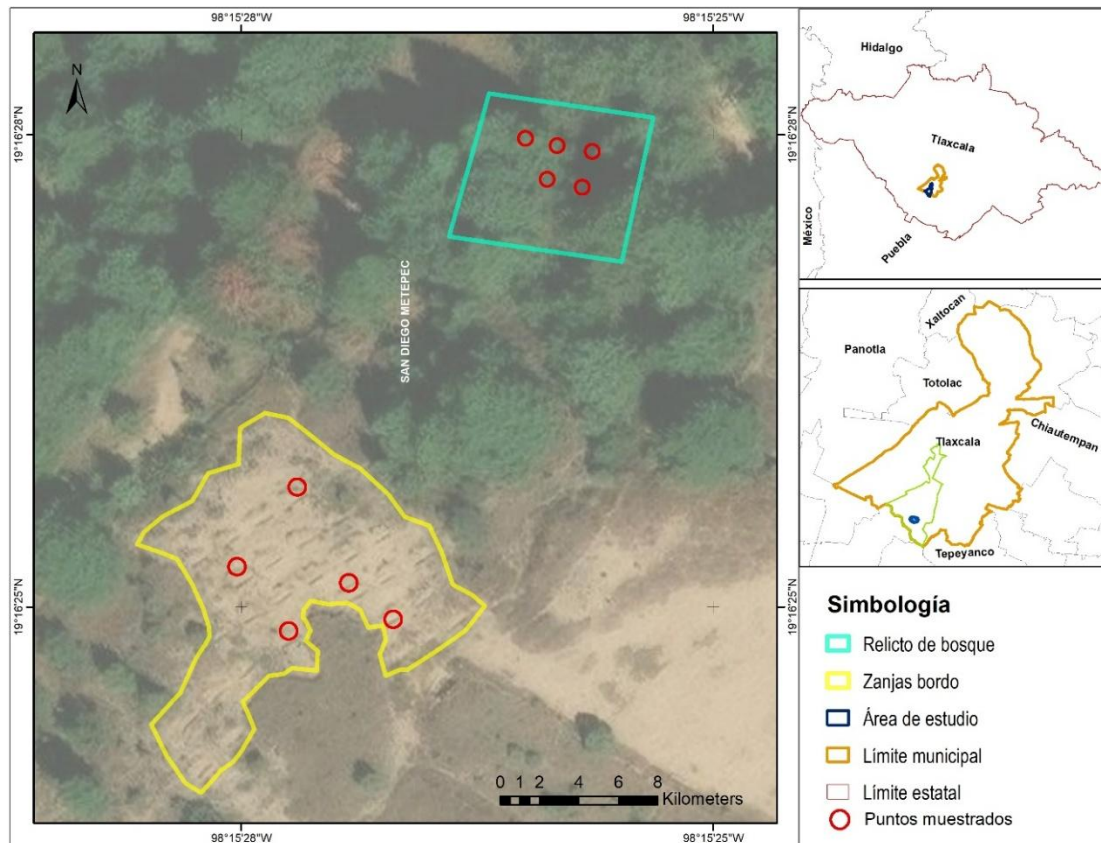


Figura 1. Ubicación de las zanjas-bordo y relicto de bosque. Fuente: elaboración propia con información de INEGI.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010, 2021) el orden de suelo dominante es Cambisol, caracterizado por ser un suelo joven y poco desarrollado, que presenta cambios iniciales en su estructura, color y

contenido de arcilla. El uso del suelo en la región es predominantemente agrícola de temporal, sin embargo, en los sitios de estudio se presenta un relicto de bosque con especies de *Pinus leiophylla* y *Cupressus lusitánica*, así como una zona desprovista de vegetación. La precipitación media anual oscila entre 700 y 800 mm, el clima es templado subhúmedo y la temperatura media anual es de 14 °C.

Muestreo y colecta de vegetación

Se realizaron dos muestreos sistemáticos de vegetación de acuerdo con Schweizer (2011), en temporada de lluvia y de seca, en octubre de 2024 y en febrero de 2025, respectivamente, en la Figura 2 y 3, se muestran las condiciones de las zanjas-bordo y el relicto de bosque en temporada de lluvia y seca. Se seleccionaron aleatoriamente cinco de las 27 zanjas-bordo. Para el suelo relicto de bosque se consideró un área de muestreo de 625 m² en el que se tomaron cinco unidades de muestreo al azar. La recolección de datos se realizó mediante el método de cuadrantes de 1 x 1 m, siguiendo la metodología de Mostacedo & Fredericksen (2000).

Los ejemplares fueron recolectados mediante técnicas convencionales siguiendo los criterios de Lot & Chiang (1986). Para cada especie registrada se recolectó un individuo representativo incluyendo su raíz, hojas, flores y/o frutos; en el caso de las especies arbustivas se recolectó ramas fértiles con hojas y flores o frutos. Cada ejemplar fue etiquetado en campo con información básica de fecha, número de colecta, número de individuos por especie y sitio para cada temporada.

Identificación de especies

Para la herborización cada ejemplar fue prensado y secado. El prensado se realizó en campo utilizando prensas botánicas con cartón corrugado y papel periódico, asegurando una adecuada disposición del material para conservar las características morfológicas. Posteriormente, se secaron mediante ventilación natural y en estufa a baja temperatura, hasta eliminar completamente la humedad (Lot & Chiang, 1986).



Figura 2. Zanjas-bordo (a y b) y relicto de bosque (c y d) en temporada de lluvia (agosto de 2024).



Figura 3. Zanjas-bordo (a y b) y relicto de bosque (c y d) en temporada seca (febrero de 2025).

Posteriormente los ejemplares fueron identificados mediante el uso de claves taxonómicas especializadas, considerando la observación morfológica detallada como el hábito de crecimiento (herbáceo o arbustivo), tipo de tallo (leñoso, herbáceo, erecto, rastrero), disposición de las hojas (alterna, opuesta, verticilada), forma, margen y nervadura de la hoja, tipo de inflorescencia y las características florales como la simetría y número de piezas florales.

También se tuvo de referencia la literatura florística regional y nacional, además de las bases de datos especializados como CONABIO-Enciclopedia y con el apoyo de especialistas en el Herbario de la División de Ciencias Forestales y en el de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Así mismo para la validación taxonómica de la diversidad vegetal se realizó con el validador de taxonomía del SNIB-CONABIO (CONABIO, Comp., 2024).

Análisis de la diversidad vegetal

La diversidad vegetal se evaluó a partir de los datos de abundancia de especies registrados en cada sitio y temporada de muestreo (lluvia y seca). El procesamiento de los datos se realizó en Microsoft Excel, para cada unidad de muestreo se determinó la riqueza de especies, el número total de individuos y se calcularon los índices de diversidad alfa de Simpson (D), así como su forma complementaria Simpson ($1-D$), Shannon-Wiener (H'), y el coeficiente de similitud de Sørensen para evaluar la diversidad beta entre sitios, los cuales permiten describir la estructura de la comunidad vegetal considerando tanto la riqueza como la equidad en la distribución de las especies. Estos índices fueron utilizados para comparar la diversidad vegetal entre el relicto de bosque y los suelos en rehabilitación mediante zanjas-bordo.

El índice de Simpson es la probabilidad de que dos organismos tomados aleatoriamente de una comunidad sean de la misma especie, se basa en la dominancia de las especies y considera la representatividad de las especies con mayor valor de importancia sin evaluar la contribución del resto de las especies (Moreno, 2001). Su cálculo se realiza por medio de la Ecuación (1), para la

interpretación de este índice, Astudillo Sánchez et al. (2019) consideran de 0.01-0.33 baja dominancia y alta diversidad; de 0.34-0.66 dominancia y diversidad media; y mayor a 0.67 alta dominancia y baja diversidad.

$$D = \sum P_i^2 \quad (\text{Ec.1})$$

Donde: D = Índice de Simpson; P_i = Proporción de la especie i en la comunidad (n_i/N).

El valor inverso muestra la probabilidad de que dos organismos tomados aleatoriamente sean de diferente especie. Este rango del índice de Simpson (1-D) va de 0 baja diversidad a 1 alta diversidad y su cálculo se realiza mediante la Ecuación (2).

$$1 - D = 1 - \sum (P_i)^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

El índice de Shannon-Wiener (H') se basa principalmente en la equidad, integra el número de especies presentes con la proporción relativa de sus abundancias y refleja la heterogeneidad de una comunidad. La fórmula empleada para su estimación se presenta en la Ecuación (3) (Martínez Arévalo, 2022).

$$H' = - \sum P_i * \ln (P_i) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde: H' = Índice de Shannon-Wiener; P_i = Abundancia relativa; $\ln (P_i)$ = Logaritmo natural de P_i .

Para su interpretación valor del índice de diversidad de Shannon-Wiener va de 0-1.35 diversidad baja; 1.36-3.5 diversidad media, y mayor a 3.6 diversidad alta (Astudillo Sánchez et al., 2019).

Por otro lado, el coeficiente de similitud de Sørensen se utiliza para determinar la diversidad beta, es decir, el cambio de especies presentes en los sitios, en este caso contribuye a la comparación de las comunidades de plantas en sitios con distintos grados de perturbación que nos indica en que grado dos sitios son semejantes debido a las especies que se encuentran en ambos (Mostacedo & Fredericksen, 2000). Su cálculo se realiza mediante la Ecuación (4), la interpretación del coeficiente va de 0 que indica que no hay especies en común entre comunidades, 0.5 refiere a similitud moderada y 1 indica que son comunidades idénticas (Velázquez Velázquez et al., 2008).

$$S_s = \frac{2a}{2a + b + c} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde: S_s = coeficiente de similitud de Sørensen; a = número de especies compartidas; b = número de especies en la muestra B, pero no en A; c = Número de especies en la muestra A, pero no en B.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el software InfoStat versión libre 2020 (Di Rienzo et al., 2020). Los datos se analizaron mediante un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 2 x 2, el primer factor fue el sitio (suelo en proceso de rehabilitación con zanjas-bordo y relicto de bosque) y segundo factor el periodo (lluvia y seca). En total cuatro tratamientos con cinco repeticiones cada uno. A los datos se le realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$), posteriormente se aplicó un análisis de varianza y una comparación de medias con el método Tukey ($p < 0.05$). El modelo lineal estadístico empleado para analizar los datos fue por la ecuación (5).

$$Y_{ij} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde: Y_{ij} =variable respuesta, μ =media general, A_i =efecto del factor sitio, B_j =efecto del factor periodo, $(AB)_{ij}$ =interacción sitio x periodo y ε_{ij} =error experimental.

Resultados y discusión

Riqueza de especies

En general se registraron 23 familias botánicas, en las zanjas-bordo se identificaron 15 familias, mientras que en el relicto de bosque 13 familias, en ambos sitios predominaron las familias Asteraceae y Poaceae (Figura 4). Las zanjas-bordo presentan mayor diversidad vegetal comparado al relicto de bosque, por la generación de microhábitats con el incremento de humedad en el suelo (Doria Treviño et al., 2021), al mismo tiempo que disminuye la erosión en el suelo y contribuye a la presencia del carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo disponible y potasio (Hegano et al., 2024; Tomar et al., 2022).

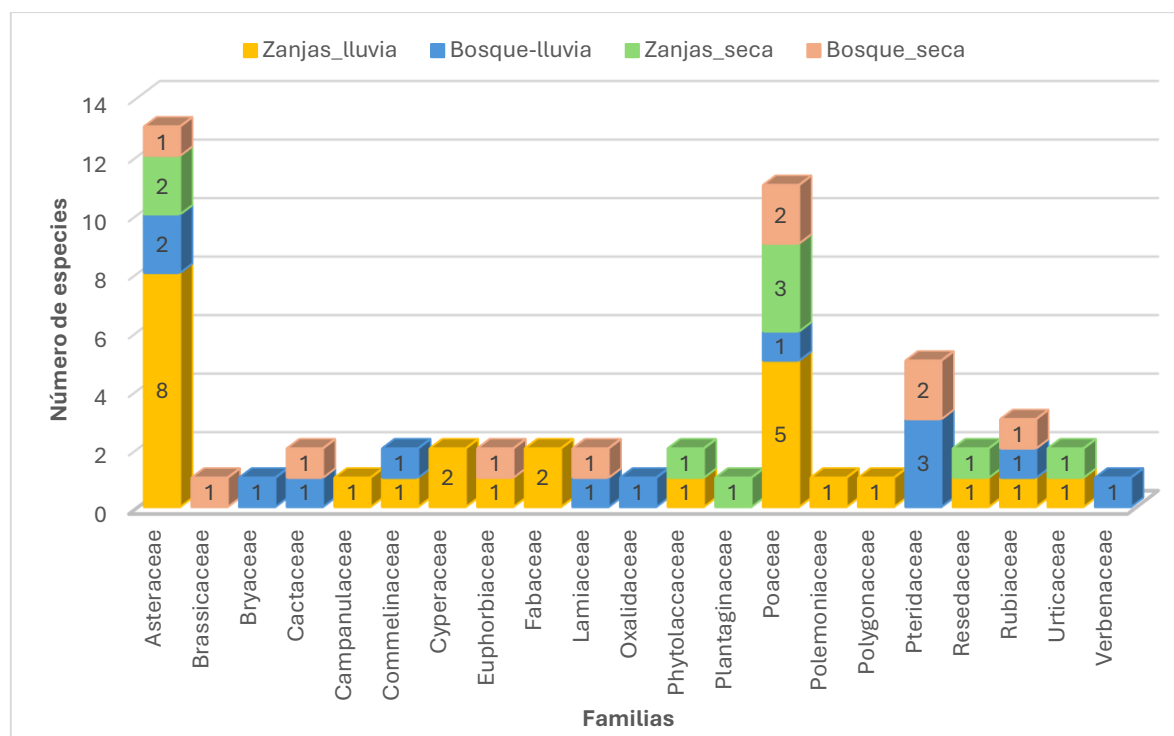


Figura 4. Riqueza de especies en las zanjas-bordo y relicto de bosque en temporada de lluvia y seca en el área de estudio. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con Linder et al. (2018) las especies de la familia Poaceae son adaptables y pueden sobrevivir en condiciones difíciles derivado de sus raíces profundas, su capacidad de rebrote y su eficiencia fotosintética, lo que les permite resistir la sequía e incluso desarrollarse en suelos compactados, ayudando además a mantener la estructura del suelo y favorecer su recuperación en ecosistemas degradados.

Especies de la familia Asteraceae destacan por su gran diversidad y capacidad de adaptación, que les permite prosperar en entornos difíciles como zonas semiáridas, degradadas o afectadas por eventos como sequías, incendios o pastoreo. Varias especies combinan mecanismos de resistencia al estrés con rasgos ruderal, lo que permite su desarrollo (Liesenfeld et al., 2019; Vlasenko, 2023; Waheed & Arshad, 2024).

La presencia de Pteridaceae se relaciona con gradientes de humedad, luminosidad, precipitación y temperatura, lo que las hace sensibles a pequeñas variaciones microclimáticas, aunque puede encontrarse también en ambientes secos, solamente se registraron en el relicto de bosque ya que tiene las condiciones para tener mayor riqueza y abundancia en estos sitios a diferencia de los sitios más con menor cubierta forestal, así como lo reporta Della & Falkenberg (2019). La presencia de la familia Rubiaceae aunado a la familia Asteraceae y Poaceae indican un ecosistema diverso lo que contribuye a una mejor resiliencia ante los cambios y perturbaciones ambientales tal como lo mencionan Kingsley et al. (2025).

De acuerdo con Martínez-y-Pérez et al. (2011), la predominancia de las familias Asteraceae y Poaceae se debe a que son las especies más resistentes a las condiciones del suelo, sin embargo, esto sugiere una adaptación progresiva y puede decirse que con la contribución de las zanjas-bordo, la sucesión ecológica se encuentra en desarrollo, ya que estas especies son consideradas pioneras.

Abundancia de especies

Respecto a la abundancia relativa, en las zanjas bordo en temporada de lluvias las familias predominantes son Poaceae, Fabaceae, Asteraceae, Commelinaceae y Cyperaceae, mientras que durante la temporada seca se encontraron las familias Poaceae y Urticaceae. Por otro lado, en el relicto de bosque en lluvia las familias predominantes son Bryaceae, Poaceae y Asteraceae; en temporada seca se encuentran Poaceae, Asteraceae, Lamiaceae y Euphorbiaceae (Figura 5).

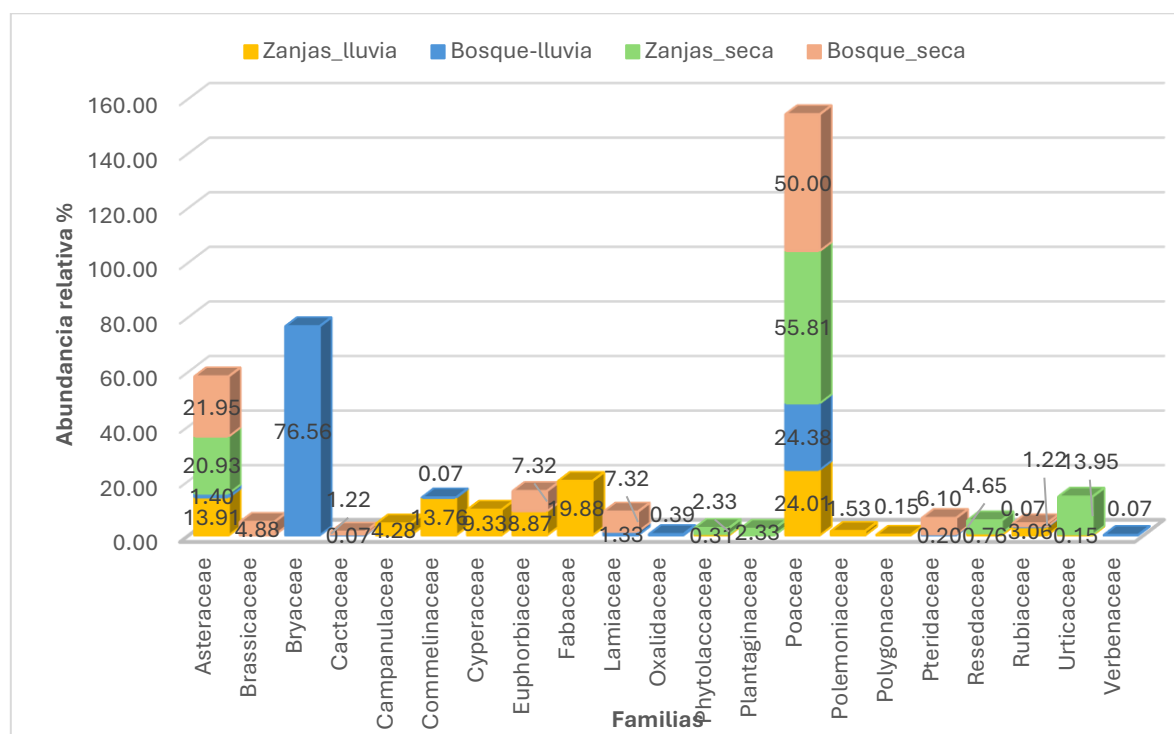


Figura 5. Abundancia relativa de individuos en las zanjas-bordo y relicto de bosque en temporada de lluvia y seca en el área de estudio. Fuente: elaboración propia.

La permanencia de individuos de Poaceae en ambos sitios ante el cambio estacional, es atribuido a la eficiencia en el aprovechamiento del agua y su rápido crecimiento durante periodos de alta precipitación, además tiene la capacidad de estabilizar el suelo derivado de su sistema radical denso y fibroso (Linder et al., 2018; Власенко et al., 2019). Así mismo, Asteraceae tiene la capacidad de que sus semillas entren en dormancia en periodo seco y ante la presencia de humedad

favorece su germinación considerando su ciclo de vida corto y su rápido establecimiento tras disturbios (Baskin & Baskin, 2023).

La alta abundancia de Fabaceae en las zanjas-bordo en temporada de lluvia puede atribuirse a su capacidad de fijación biológica de nitrógeno, por lo que es capaz de desarrollarse en suelos con limitaciones nutrimentales Tognetti et al. (2021); así mismo Commelinaceae a pesar de que principalmente se desarrolla en bosques, también crecen en lugares perturbados y en zonas semiáridas (Cabrera-Manuel et al., 2020); al igual que Cyperaceae se debe a que estos se desarrollan en suelos con regímenes de humedad de moderados a altos (EO et al., 2020); por lo que estas se establecen en presencia de humedad derivado de la presencia de las zanjas-bordo.

La permanencia de la abundancia de los individuos de Urticaceae en la temporada seca en las zanjas-bordo se debe a que son capaces de tolerar la sequía y pueden tolerar la falta de nutrientes como el fósforo principalmente en los machos, ya que estas especies presentan dimorfismo sexual (Simancas et al., 2016).

En el relicto de bosque la abundancia de Bryaceae durante la temporada de lluvia se debe a que se desarrollan en sitios forestales colonizando suelo, rocas y troncos, favorecidas por alta humedad y sombreado, sin embargo, muestran sensibilidad a las alteraciones ambientales, es decir, cuando hay apertura del dosel (de Lima et al., 2025).

Ante el cambio estacional, en el relicto de bosque se presenta alta abundancia de especies de la familia Lamiaceae puede deberse que ante condiciones de estrés se adapta perdiendo la mayor o una pequeña parte de su biomasa como, así mismo la presencia de sombra genera un microambiente que contribuye a la supervivencia y crecimiento de estas especies (Mendoza-Hernández et al., 2013); y Euphorbiaceae específicamente *Euphorbia dentata* Michx., 1803 que se desarrolla como arvense ruderal en sitios perturbados, así como en bosques de pino-encino, así mismo, es una especie invasora y la abundancia en la temporada seca en el relicto de bosque puede estar relacionada a alta capacidad de tolerancia ecológica, además contiene

látex que es un mecanismo de defensa ante la presencia de insectos herbívoros (An et al., 2023).

Diversidad vegetal

En zanjas-bordo durante la temporada de lluvias se registraron 13 familias distribuidos en 25 géneros (Cuadro 1) y un total de 26 especies vegetales (Cuadro 2). Las familias con mayor diversidad fueron Poaceae, Asteraceae, Cyperaceae y Fabaceae, ante el cambio de temporada se registraron especies que permanecen en el sitio, mostrando una notable tolerancia frente a las variaciones en la precipitación y la temperatura. Se registraron nueve especies, distribuidas en nueve géneros y seis familias. La familia predominante fue Poaceae, Asteraceae y Resedaceae.

Cuadro 1. Familia, género y número de especies vegetales en las zanjas-bordo y el relicto de bosque en temporada de lluvia y seca.

Sitio	Temporada	Familia	Género	Especies
Zanja-bordo	Lluvia	13	25	26
	Seca	6	9	9
Relicto de bosque	Lluvia	10	13	13
	Seca	8	10	10

Fuente: elaboración propia.

En el relicto de bosque en temporada de lluvia se encontraron 13 especies correspondientes a 10 familias y 13 géneros, la familia predominante fue Pteridaceae y Asteridaceae, asimismo durante la temporada seca la presencia de especies vegetales disminuyó, teniendo ocho familias distribuidas en diez géneros y diez especies, predominando la familia Poaceae y Pteridaceae.

La predominancia y permanencia estacional de las familias Poaceae y Asteraceae sugiere una adaptación progresiva de la vegetación al entorno, circunstancia que puede favorecer las condiciones del suelo para el establecimiento de nuevas especies arbustivas y arbóreas que incidan en el incremento de la cobertura vegetal, así mismo, contribuya a frenar el empobrecimiento y degradación de estos suelos.

Cuadro 2. Familia y nombre científico de las especies vegetales encontradas en las zanjas-bordo y el relicto de bosque por temporada.

Familia	Nombre científico	Lluvia	Seca
Asteraceae	<i>Bidens pilosa</i> L., 1753	B-Z	B
	<i>Brickellia veronicifolia</i> (Kunth)		
	A. Gray, 1852	Z	Z
	<i>Chromolaena pulchella</i> (Kunth)		
	R.M. King & H. Rob., 1970	Z	
	<i>Conyza sophiifolia</i> Kunth, 1818	Z	
	<i>Cosmos bipinnatus</i> Cav., 1791	Z	
	<i>Dyssodia papposa</i> (Vent.) Hitchc., 1891		Z
	<i>Galinsoga parviflora</i> Cav., 1796	B	
	<i>Gnaphalium polycaulon</i> Pers., 1807	Z	
	<i>Schkuhria pinnata</i> (Lam.)		
	Kuntze ex Thell., 1912	Z	
	<i>Sonchus oleraceus</i> L., 1753	Z	
	<i>Descurainia virletii</i> (E. Fourn.)		
Brassicaceae	O.E. Schulz, 1924		B
Bryaceae	<i>Bryum billarderi</i> Schwägr., 1816	B	
Cactaceae	<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Mill., 1768	B	B
Campanulaceae	<i>Diastatea tenera</i> (A. Gray) McVaugh, 1940	Z	
Commelinaceae	<i>Commelina</i> Delile, 1812	B	
	<i>Tripogandra purpurascens</i>		
	(S. Schauer) Handlos, 1970	Z	
Cyperaceae	<i>Cyperus esculentus</i> L., 1753	Z	
	<i>Cyperus squarrosus</i> L., 1756	Z	
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia dentata</i> Michx., 1803	Z	B
Fabaceae	<i>Medicago polymorpha</i> L., 1753	Z	
	<i>Strophostyles leiosperma</i> (Torr. & A. Gray)		
	Piper, 1926	Z	
Lamiaceae	<i>Salvia mexicana</i> L., 1753	B	B
Oxalidaceae	<i>Oxalis corniculata</i> L., 1753	B	
Phytolaccaceae	<i>Phytolacca icosandra</i> L., 1759	Z	Z
Plantaginaceae	<i>Mecardonia procumbens</i> (Mill.) Small, 1903		Z
Poaceae	<i>Bromus catharticus</i> Vahl, 1791	Z	
	<i>Eragrostis lugens</i> Nees, 1829	Z	Z
	<i>Lolium perenne</i> L., 1753	B	B
	<i>Melinis repens</i> (Willd.) Zizka, 1988	Z	Z
	<i>Muhlenbergia capillaris</i> (Lam.) Trin., 1824	Z	B-Z
	<i>Zea mays</i> L., 1753	Z	
Polemoniaceae	<i>Loeselia mexicana</i> (Lam.) Brand, 1907	Z	
Polygonaceae	<i>Rumex crispus</i> L., 1753	Z	
Pteridaceae	<i>Cheilanthes bonariensis</i> (Willd.) Proctor, 1953	B	B

	<i>Gaga marginata</i> (Kunth) F.W. Li & Windham, 2012	B	
	<i>Myriopteris aurea</i> (Poir.) Grusz & Windham, 2013		B
	<i>Myriopteris gracilis</i> Fée, 1852	B	
Resedaceae	<i>Reseda luteola</i> L., 1753	Z	Z
Rubiaceae	<i>Bouvardia obovata</i> Kunth, 1820 <i>Crusea simplex</i> (Willd. ex Roem. & Schult.) J.H. Kirkbr. & Wiersema, 2020	B Z	B
Urticaceae	<i>Urtica dioica</i> L., 1753	Z	Z
Verbenaceae	<i>Priva mexicana</i> (L.) Pers., 1806	B	

B= especies encontradas en el relicto de bosque, Z= especies encontradas en las zanjas-bordo. Fuente: Elaboración propia

Permanencia de especies ante el cambio estacional

La permanencia de las especies ante el cambio estacional se relaciona con sus características ecológicas y ecofisiológicas particulares que les permiten tolerar variaciones en la disponibilidad de agua, nutrientes y temperatura. En el caso de *Bidens pilosa* L., 1753 se debe a que esta especie disminuye su apertura estomática y pierde sus hojas para asegurar la supervivencia frente a la disminución de la humedad, así mismo, tiene capacidad de absorber nutrientes y la humedad, aunque solo cuando se encuentra al 25% de la capacidad del campo, por lo que puede desarrollarse ante el cambio estacional y en sitios con condiciones degradadas (De Freitas et al., 2021). Se considera una especie invasora y es debido a la adaptabilidad que tiene ante los cambios de luz, agua, nutrientes y temperatura (Kato-Noguchi & Kurniadie, 2024).

Por su parte, *Lolium perenne* L., 1753 tiene la capacidad de producir un número mayor de macollos, además muestran un mejor ajuste osmótico y tienen un mayor contenido hídrico en el follaje aun cuando disminuye la humedad en el suelo (Ganderats F. & Hepp K., 2003; Lee et al., 2019).

Así mismo, *Salvia mexicana* L., 1753 es un arbusto que ante el estrés hídrico pierde una pequeña o gran parte de su follaje, crece principalmente en brechas y bosques

templados perturbados, la sombra que generan los relictos de bosque incrementan la supervivencia de esta especie (Mendoza-Hernández et al., 2013).

Opuntia ficus-indica es una cactácea con metabolismo CAM (metabolismo ácido crassulaceo), que fija CO₂ de noche, manteniendo las estomas cerradas de día, por lo que reduce fuertemente la pérdida de agua (Khodaeiaminjan et al., 2021).

Algunas especies de la familia Pteridaceae como *Cheilanthes spp.* son capaces de tolerar pérdidas de agua y recuperar su metabolismo tras la rehidratación (Farrant et al., 2022; Pittermann et al., 2013).

Las especies de la familia Poaceae tienen alta capacidad de colonización, persistencia y transformación del hábitat, basado en rápido establecimiento de las especies, es capaz de adaptarse a diferentes condiciones ambientales y es resiliente ante el estrés por sequía incluso ante el fuego (Linder et al., 2018). Las gramíneas como *Eragrostis lugens*; *Melinis repens* y *Muhlenbergia capillaris* pueden desarrollar sistemas radicales profundos y amplios, con alta cantidad de raíces finas, que permiten acceder agua en profundidad y aprovechar pulsos de humedad en perfiles secos (Holmes & Rice, 1996; Swindon et al., 2019), además pueden mostrar alta resiliencia considerando los incrementos de humedad después de un periodo seco (Hoover et al., 2021; Peters & Savoy, 2023).

Urtica dioica es considerada una especie ruderal, con rápido crecimiento que, en presencia de humedad, y suelos ricos en nutrientes con altos contenidos de nitrógeno y fósforo, así como en presencia de leguminosas fijadoras, se pueden formar agrupamientos de solo esta especie. Se asocia a suelos con alto contenido de materia orgánica, también puede acumular minerales como potasio y calcio, por lo que se ha propuesto como bioindicador de fertilidad y calidad de suelo (Tarkanyi et al., 2024; Taylor, 2009).

Phytolacca icosandra es una especie que se distribuye en lugares perturbados, sin embargo, Li et al. (2025) y Magray et al., (2022) mencionan que especies del género

Phytolacca se asocian a suelos con mayor contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, por lo que estas especies aprovechan los sitios fértiles para desarrollarse.

Reseda luteola es una maleza arvense y ruderal de zona árida y semiárida se distribuye principalmente en sitios con disturbio, es de importancia melífera, forrajera y como colorante natural (Sandoval-Ortega & Siqueiros-Delgado, 2019), por lo que esta especie se desarrolla en sitios degradados como el tepetate.

La presencia de especies contrastantes entre el relicto de bosque y las zanjas-bordo evidencia las condiciones edáficas sobre la composición florística y en respuesta a los cambios estacionales. El relicto de bosque mantiene especies asociadas a mayor estabilidad ambiental y estrategias de tolerancia al estrés hídrico prolongado, la diversidad vegetal de las zanjas-bordo están determinadas por especies oportunistas y gramíneas perennes que responden a los pulsos de humedad y disturbio. Estas diferencias muestran la importancia de las zanjas-bordo para la recuperación de la cobertura vegetal y la estabilización del suelo, aunque con una composición florística distinta a la del ecosistema original.

Índices de diversidad vegetal

El análisis de varianza mostró que el factor sitio es significativamente diferente ($p < 0.05$) para ambas variables, el factor temporada no es significativo ($p > 0.05$), sin embargo, la interacción de sitio por temporada es significativamente diferente (Cuadro 3).

Las comparaciones múltiples indicaron que los valores más altos de diversidad se registraron en las zanjas-bordo durante las lluvias ($1-D=0.70$ y $H'=1.53$), mientras que el relicto de bosque en temporada de lluvias presentó los valores más bajos ($1-D=0.23$, $H'=0.40$). En temporada seca en ambos sitios mostraron valores intermedios, sin diferencias significativas entre ellos ($p > 0.05$).

Cuadro 3. Índices de diversidad vegetal en suelo relicto de bosque y zanjas-bordo en periodo de lluvia y seca.

Sitio	Temporada	Índice
-------	-----------	--------

		Simpson (1-D)	Shannon-Wiener (H')
Zanja-bordo	Lluvia	0.70 a ²	1.53 a
	Seca	0.48 ab	0.81 b
Bosque	Lluvia	0.23 b	0.40 b
	Seca	0.41 ab	0.74 b

²Media con una letra común por columna no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). Fuente: elaboración propia.

En la temporada de lluvia, en zanjas-bordo existe mayor diversidad de especies indicando mayor riqueza con un índice de Shannon-Wiener de 1.53 y de Simpson (1-D) de 0.70 demostrando que las especies están distribuidas de manera más uniforme. Por otro lado, el suelo relicto de bosque en temporada de lluvia indica una riqueza baja y está dominado por pocas especies con un índice de Simpson (1-D) de 0.23 y el índice de Shannon-Wiener de 0.40 indica que la distribución de las especies es equitativa.

Derivado de lo anterior, los resultados indican que las condiciones de humedad favorecen el establecimiento y crecimiento de la diversidad vegetal en zonas rehabilitadas con obras de conservación como son las zanjas-bordo, así como lo indican Reyes Carrillo et al. (2019) que en las zanjas se establece vegetación y contribuye a incrementar la cobertura vegetal. Así como, cuando hay precipitación se favorecen cambios significativos en la estructura y composición de la vegetación, así mismo interviene el tipo de suelo (Domínguez Gómez et al., 2013; Estrada Castillón et al., 2004).

En temporada seca, el índice de Simpson (1-D) en las zanjas-bordo disminuyó a 0.48 con respecto a la temporada de lluvia, y el índice de Shannon-Wiener a 0.81, lo que indica una reducción de la diversidad y un incremento en la dominancia de algunas especies, probablemente asociada al estrés hídrico estacional.

El relicto de bosque en seca el índice de Simpson (1-D) incrementó a 0.41, lo que sugiere una ligera reducción en la dominancia de especies; sin embargo, el índice de Shannon-Wiener se mantuvo bajo y similar al periodo de lluvias (0.74). La estabilidad en los valores de diversidad indica que el relicto de bosque presenta una composición vegetal relativamente constante entre temporadas, mostrando una

menor sensibilidad a la estacionalidad en comparación con los sitios de zanjas-bordo.

En temporada seca, la diversidad vegetal disminuyó en general, las zanjas-bordo presentan una alta diversidad y dominancia de pocas especies, y el suelo relicto de bosque presenta valores intermedios. La disminución de la diversidad vegetal en ambos sitios se debe al cambio estacional, ya que solamente algunas especies son tolerantes a la sequía y capaces de adaptarse a las condiciones que se propician de menor humedad y mayor temperatura, y en el caso del relicto de bosque se adiciona la presencia de sombra (Linder et al., 2018; Martínez-y-Pérez et al., 2011).

Similitud de la diversidad vegetal en las zanjas-bordo vs relicto de bosque

Así mismo, el coeficiente de similitud de Sørensen (Cuadro 4), indica que, en ambas temporadas no existe similitud entre el suelo relicto de bosque y zanjas, ya que solamente *Bidens pilosa* L., 1753 se encuentra en temporada de lluvia y *Muhlenbergia capillaris* (Lam.) Trin., 1824 durante la temporada seca, en ambos sitios. Lo anterior indica que existe una alta tasa de sustitución de especies en los sitios ante el cambio estacional (Morales-Vega et al., 2025).

Cuadro 4. Coeficiente de similitud de Sørensen entre las zanjas-bordo y el relicto de bosque en temporada de lluvia y seca.

Coeficiente de similitud de Sørensen		
	Lluvia	Seca
Bosque/Zanja	0.049	0.095

Fuente: elaboración propia.

Conclusión

La estacionalidad influye significativamente en la diversidad vegetal, con mayor presencia en lluvias; sin embargo, la permanencia de especies en temporada seca y la diferencia notoria respecto al bosque, indican que las zanjas-bordo representan un sistema en proceso de recuperación, teniendo potencial para la rehabilitación del

tepetate y favorecer el desarrollo de la diversidad vegetal. Por otro lado, es importante la conservación del relicto de bosque, ya que ante el cambio estacional también disminuye la diversidad vegetal.

Literatura citada

- Alvarado Cardona, M., Colmenero Robles, J. A., & Valderrábano Almegua, Ma. de la L. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14, 317–326. <https://www.redalyc.org/pdf/104/10414309.pdf>
- An, T., Cao, D., Zhang, Y., Han, X., Yu, Z., & Liu, Z. (2023). Norsesquiterpenes from the Latex of *Euphorbia dentata* and Their Chemical Defense Mechanisms against *Helicoverpa armigera*. *Molecules*, 28(23), 7681. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28237681/S1>
- Astudillo Sánchez, E., Pérez, J., Troccoli, L., & Aponte, H. (2019). Composición, estructura y diversidad vegetal de la Reserva Ecológica Comunal Loma Alta, Santa Elena, Ecuador. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90(3), 1–25. <https://revista.ib.unam.mx/index.php/bio/article/view/2871/2017>
- Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2023). Seed dormancy in Asteraceae: a global vegetation zone and taxonomic/phylogenetic assessment. *Seed Science Research*, 33(2), 135–169. <https://doi.org/10.1017/S0960258523000107>
- Blanco-Valdes, Y. (2016). The role of weeds as a component of biodiversity in agroecosystems. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 34–56. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10964.19844>
- Brockerhoff, E. G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D. I., Gardiner, B., González-Olabarria, J. R., Lyver, P. O. B., Meurisse, N., Oxbrough, A., Taki, H., Thompson, I. D., van der Plas, F., & Jactel, H. (2017). Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 26(13), 3005–3035. <https://doi.org/10.1007/S10531-017-1453-2>
- Cabrera-Manuel, F., Siqueiros-Delgado, M. E., Ceja-Romero, J., & Sosa-Ramírez, J. (2020). Orden Commelinales en Aguascalientes, México. *Botanical Sciences*, 98(4), 593–611. <https://doi.org/10.17129/BOTSCI.2594>
- Cardoso, E. J. B. N., Vasconcellos, R. L. F., Bini, D., Miyauchi, M. Y. H., dos Santos, C. A., Alves, P. R. L., de Paula, A. M., Nakatani, A. S., Pereira, J. de M., & Nogueira, M. A. (2013). Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Scientia Agrícola*, 70(4), 274–289. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009>

- Chávez Durán, Á. A., Flores López, H. E., Mora Orozco, C. de la, Ruíz Corral, J. A., Ramírez Ojeda, G., Rubio Camacho, E., Chávez Durán, Á. A., Flores López, H. E., Mora Orozco, C. de la, Ruíz Corral, J. A., Ramírez Ojeda, G., & Rubio Camacho, E. (2014). Sensibilidad de zonas bioclimáticas de México frente al cambio climático. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(SPE10), 2021–2033. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014001402021&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- CONABIO (comp.) 2024. Catálogo de autoridades taxonómicas de especies de flora y fauna con distribución en México. Validador de taxonomía SNIB-CONABIO, México. Consultado [11/02/2026] en <https://www.snib.mx/taxonomia/validacion/>
- De Freitas, M. A. M., Lins, H. A., Souza, M. D. F., Carneiro, G. D. O. P., Mendonça, V., & Silva, D. V. (2021). Déficit hídrico en el crecimiento e indicadores fisiológicos de *Bidens pilosa* L. y *Biden subalternans* DC. *Revista Caatinga*, 34(2), 388–397. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021V34N215RC>
- de Lima, J. S., Faria, A. L. A., Gonçalves, M. T. A., & Peralta, D. F. (2025). Bryophytes of the Serra dos Órgãos National Park: Endemism and Conservation in the Atlantic Forest. *Plants*, 14(15), 2419. <https://doi.org/10.3390/PLANTS14152419>
- Della, A. P., & Falkenberg, D. de B. (2019). Pteridophytes as ecological indicators: an overview. *Hoehnea*, 46(1), e522018. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-52/2018>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat* (versión 2020) [Software]. Centro de Transferencia InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. <https://www.infostat.com.ar>
- Domínguez Gómez, T. G., González Rodríguez, H., Ramírez Lozano, R. G., Estrada Castellón, A. E., Cantú Silva, I., Gómez Meza, M. V., Villareal Quintanilla, J. Á., Alvarado, M. del S., & Alanís Flores, G. (2013). Diversidad estructural del matorral espinoso tamaulipeco durante las épocas seca y húmeda. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(17), 106–122. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322013000300011&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Doria Treviño, O. A., Mendoza Aguilar, D. O., Gutiérrez Gutiérrez, M., & Pando-Moreno, M. (2021). Efecto de una obra de conservación de suelo en el patrón de distribución de la vegetación y funcionalidad del ecosistema. *e-CUCBA*, (17), 229–237. <https://doi.org/10.32870/ECUCBA.VI17.230>
- EO, M., SR, O., DG, U., & I, E. (2020). Abundance and distribution of species in relation to soil properties in sedge-dominated habitats in Uyo Metropolis,

- Southern Nigeria. *Global Journal of Ecology*, 5(1), 024–029. <https://doi.org/10.17352/GJE.000015>
- Estrada Castellón, E., Méndez, C. Y., Delgado Salinas, A., & Villarreal Quintanilla, J. A. (2004). Leguminosas del centro del estado de Nuevo León, México. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 75(1), 73–85. <http://www.ibiologia.unam.mx/BIBLIO68/fulltext/art-bota/anabot751/analesbot5.pdf>
- Farrant, J. M., Awlia, M., Alejo-Jacuinde, G., & Herrera-Estrella, L. (2022). Exploring the High Variability of Vegetative Desiccation Tolerance in Pteridophytes. *Plants*, 11(9), 1222. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11091222>
- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., & 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. <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a11>
- Ganderats F., S., & Hepp K., C. (2003). Mecanismos de crecimiento de *Lolium perenne*, *Festuca arundinacea* y *Dactylis glomerata* en la zona intermedia de Aysén. *Agricultura Técnica*, 63(3), 259–265. <https://doi.org/10.4067/S0365-28072003000300005>
- García Gallegos, E., Vázquez Cuecuecha, O. G., Guerra-De la Cruz, V., & Cocoltzi Pérez, F. J. (2023). Evaluación del efecto de obras de conservación en suelos forestales de Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(78), 34–57. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V14I78.1385>
- Hegano, A., Handiso, M. A., Animaw, Y., & Lamage, B. (2024). Effectiveness of Soil and Water Conservation Measures on Degraded Mountain Ecosystems: Enhancing Soil Moisture, Seedling Growth, and Biodiversity in Baka-Dawla Aari District, Southern Ethiopia. *European Journal of Ecology, Biology and Agriculture*, 1(4), 23–34. [https://doi.org/10.59324/EJEBA.2024.1\(4\).03](https://doi.org/10.59324/EJEBA.2024.1(4).03)
- Holmes, T. H., & Rice, K. J. (1996). Patterns of Growth and Soil-water Utilization in some Exotic Annuals and Native Perennial Bunchgrasses of California. *Annals of Botany*, 78(2), 233–243. <https://doi.org/10.1006/ANBO.1996.0117>
- Hoover, D. L., Pfennigwerth, A. A., & Duniway, M. C. (2021). Drought resistance and resilience: The role of soil moisture–plant interactions and legacies in a dryland ecosystem. *Journal of Ecology*, 109(9), 3280–3294. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13681>;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:13652745;ISSUE:ISSUE:DOI
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010. Tlaxcala, Tlaxcala. Clave geoestadística 29033*.

https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/29/29033.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Diccionario de Datos Edafológicos* Escala 1:250 000. https://www.gslb.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463842644.pdf

Jaroszewicz, B., Cholewińska, O., Gutowski, J. M., Samojlik, T., Zimny, M., & Latałowa, M. (2019). Białowieża Forest—A Relic of the High Naturalness of European Forests. *Forests*, 10(10), 849. <https://doi.org/10.3390/F10100849>

Kato-Noguchi, H., & Kurniadie, D. (2024). The Invasive Mechanisms of the Noxious Alien Plant Species *Bidens pilosa*. *Plants*, 13(3), 356. <https://doi.org/10.3390/PLANTS13030356>

Khodaeiaminjan, M., Nassrallah, A. A., & Kamal, K. Y. (2021). Potential attribute of crassulacean acid metabolism of *Opuntia spp.* production in water-limited conditions. En *Opuntia spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications* (pp. 201–218). Springer International Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-78444-7>

Kingsley, O. E., Kenneth, E. U., Chukwu, O. N., Obumneme, S. C., Olando, N. C., Angela, O. C., Francis, O. A., & Francis, O. O. (2025). Seed Bank Dynamics and Above-Ground Species Composition in Secondary Tropical Forests of Anambra State, Nigeria: Implications for Biodiversity Conservation. *Journal of Applied Life Sciences International*, 28(1), 55–74. <https://doi.org/10.9734/JALSI/2025/V28I1679>

Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212–222. <https://doi.org/10.1002/FES3.96>

Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C. A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R. I., Mellado-Vázquez, P. G., Malik, A. A., Roy, J., Scheu, S., Steinbeiss, S., Thomson, B. C., Trumbore, S. E., & Gleixner, G. (2015). Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, 6, 6707. <https://doi.org/10.1038/ncomms7707>

Lee, M. A., Howard-Andrews, V., & Chester, M. (2019). Resistance of Multiple Diploid and Tetraploid Perennial Ryegrass (*Lolium perenne* L.) Varieties to Three Projected Drought Scenarios for the UK in 2080. *Agronomy*, 9(3), 159. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY9030159>

Li, H., Deng, Y., Zhang, S., Greenberg, J., Chen, D., Song, X., Geng, X., Zhuge, Y., Li, C., Ni, G., & Hou, Y. (2025). Nutrient availability and invader density regulate the diversity–invasibility relationship mediated by soil microbes. *Functional Ecology*, 39(10), 2717–2729. <https://doi.org/10.1111/1365->

- Liesenfeld, V., Gentz, P., De Freitas, E. M., & Martins, S. (2019). Leaf morphology and anatomy of Asteraceae of the Pampas biome (sand-fields). *Flora*, 258, 151418. <https://doi.org/10.1016/J.FLORA.2019.151418>
- Linder, H. P., Lehmann, C. E. R., Archibald, S., Osborne, C. P., & Richardson, D. M. (2018). Global grass (Poaceae) success underpinned by traits facilitating colonization, persistence and habitat transformation. *Biological Reviews*, 93(2), 1125–1144. <https://doi.org/10.1111/BRV.12388>
- Lot, A., & Chiang, F. (1986). *Manual de herbario: Administración de colecciones, técnicas de recolección y preparación de ejemplares botánicos*. Consejo Nacional de la Flora de México, A.C.
- Magray, J. A., Wani, B. A., Islam, T., Ganie, A. H., & Nawchoo, I. A. (2022). Phytoecological analysis of *Phytolacca acinosa* Roxb. assemblages in Kashmir Himalaya, India. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 976902. <https://doi.org/10.3389/FFGC.2022.976902/BIBTEX>
- Martínez Arévalo, J. V. (2022). El cálculo de diversidad biológica. Parte I: Diversidad biológica alfa. *Tikalía*, 41(1), 48–62. https://www.researchgate.net/profile/Jose-Vicente-Martinez-Arevalo/publication/372854379_El_calculo_de_diversidad_biologica_Parte_I_Diversidad_biologica_alfa/links/64ca8f3c91fb036ba6bfa747/El-calculo-de-diversidad-biologica-Parte-I-Diversidad-biologica-alfa.pdf
- Martínez-y-Pérez, J. L., Castillo-Campos, G., Santiago-Martínez, Ma. G., & Hernández-Cuevas, L. V. (2011). Análisis florístico en tepetates del estado de Tlaxcala. *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(2), 623–637. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532011000200021&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Mendoza-Hernández, P. E., Rosete-Rodríguez, A., Sánchez-Coronado, M. E., Orozco, S., Pedrero-López, L., Méndez, I., & Orozco-Segovia, A. (2013). Vegetation patches improve the establishment of *Salvia mexicana* seedlings by modifying microclimatic conditions. *International Journal of Biometeorology*, 58(5), 853–866. <https://doi.org/10.1007/S00484-013-0665-8>
- Morales-Vega, K. M., López-Orozco, C. M., Carpio-Díaz, Y. M., Borja-Arrieta, R., Taboada-Verona, C., Soares Campos-Filho, I., & Navas-S, G. R. (2025). Does Seasonality Influence the α and β -diversity of Soil Fauna? A Case Study of Terrestrial Isopods (Isopoda, Oniscidea) Assemblage in the Colombian Caribbean Tropical Dry Forest. *Zoological Studies*, 64(5). <https://doi.org/10.6620/ZS.2025.64-05>

- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad* (Vol. 1). M&T–Manuales y Tesis SEA. <http://entomologia.rediris.es/sea>
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal* (D. Nash, Ed.). El País. <http://www.bio-nica.info/Biblioteca/Mostacedo2000EcologiaVegetal.pdf>
- Peters, D. P. C., & Savoy, H. M. (2023). A sequence of multiyear wet and dry periods provides opportunities for grass recovery and state change reversals. *Ecological Monographs*, 93(4), e1590. <https://doi.org/10.1002/ECM.1590;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Pittermann, J., Brodersen, C., & Watkins, J. E. (2013). The physiological resilience of fern sporophytes and gametophytes: Advances in water relations offer new insights into an old lineage. *Frontiers in Plant Science*, 4(285), 49796. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2013.00285/BIBTEX>
- Reyes Carrillo, A., Martínez Menez, M. R., Rubio Granados, E., García Moya, E., & Exebio García, A. A. (2019). Impact of the ditch check dam system over the vegetation coverage of grasslands in the Mixteca region, State of Oaxaca. *Revista Terra Latinoamericana*, 37(3), 231–242. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V37I3.327>
- Reynaert, S., De Boeck, H. J., Verbruggen, E., Verlinden, M., Flowers, N., & Nijs, I. (2021). Risk of short-term biodiversity loss under more persistent precipitation regimes. *Global Change Biology*, 27(8), 1614–1626. <https://doi.org/10.1111/GCB.15501;JOURNAL:JOURNAL:13652486;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Sandoval-Ortega, M. H., & Siqueiros-Delgado, M. E. (2019). *Reseda luteola* L. en el estado de Aguascalientes, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (76), 5–10. <https://doi.org/10.33064/IYCUAA2019761786>
- Schweizer, L. (2011). *Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria y Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José Costa Rica. 18 p. <https://www.inag.go.cr/bibliotecavirtual/p33-9965.pdf>
- Shen, C., Wang, J., Jing, Z., Qiao, N. H., Xiong, C., & Ge, Y. (2022). Plant diversity enhances soil fungal network stability indirectly through the increase of soil carbon and fungal keystone taxa richness. *Science of The Total Environment*, 818, 151737. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151737>
- Simancas, B., Juvany, M., Cotado, A., & Munné-Bosch, S. (2016). Sex-related differences in photoinhibition, photo-oxidative stress and photoprotection in stinging nettle (*Urtica dioica* L.) exposed to drought and nutrient deficiency.

- Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 156, 22–28.
<https://doi.org/10.1016/J.JPHOTOBIO.2016.01.005>
- Swindon, J. G., Burke, I. C., & Lauenroth, W. K. (2019). Seasonal Patterns of Root Production with Water and Nitrogen Additions Across Three Dryland Ecosystems. *Ecosystems*, 22(7), 1664–1675.
<https://doi.org/10.1007/S10021-019-00364-Y>
- Tarkanyi, P., Lăcătuș, M., Alexa, E., & Bordean, D.-M. (2024). Mineral bioaccumulation in stinging nettle: a tool for enhancing functional food safety. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 30(4), 335–342.
<https://doi.org/10.59463/JAPT.2024.2.31>
- Taylor, K. (2009). Biological flora of the British Isles: *Urtica dioica* L. *Journal of Ecology*, 97(6), 1436–1458. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2745.2009.01575.X>;JOURNAL:JOURNAL:13652745;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:13652745;WEBSITE:WEBSITE:BESJOURNALS;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Tognetti, P. M., Prober, S. M., Báez, S., Chaneton, E. J., Firn, J., Risch, A. C., Schuetz, M., Simonsen, A. K., Yahdjian, L., Borer, E. T., Seabloom, E. W., Arnillas, C. A., Bakker, J. D., Brown, C. S., Cadotte, M. W., Caldeira, M. C., Daleo, P., Dwyer, J. M., Fay, P. A., ... Sankaran, M. (2021). Negative effects of nitrogen override positive effects of phosphorus on grassland legumes worldwide. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(28), e2023718118.
<https://doi.org/10.1073/PNAS.2023718118>;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Tomar, J. M. S., Kumar, R., Kaushal, R., Kar, S. K., Mehta, H., & Chaturvedi, O. P. (2022). Soil conservation measures improve vegetation development and ecological processes in the Himalayan slopes. *Tropical Ecology*, 64(1), 53–61. <https://doi.org/10.1007/S42965-022-00247-9>
- Velázquez Velázquez, E., Pérez Farrera, M. ángel, & Chávez Cortazar, A. (2008). El análisis de la comunidad: parámetros y evaluaciones de la diversidad biológica. *Lacandonia*, 2, 131–139.
<https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/1785>
- Vlasenko, M. (2023). Pasture phytocomplexes of Pridonye: Ecological situation. *E3S Web of Conferences*, 395, 04002.
<https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202339504002>
- Vlasenko, M., & Trubakova, K. (2019). Water regime Poaceae family species in the drought conditions. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 190(11), 2–8.
https://doi.org/10.32417/ARTICLE_5DCD861E230788.72509133

Waheed, M., & Arshad, F. (2024). Adaptive convergence and divergence underpin the diversity of Asteraceae in a semi-arid lowland region. *Flora*, 317, 152554. <https://doi.org/10.1016/J.FLORA.2024.152554>

CAPÍTULO 5. CALIDAD EDÁFICA Y DIVERSIDAD VEGETAL EN SUELO REHABILITADO, TEPETATE Y RELICTO DE BOSQUE BAJO ESTACIONALIDAD CLIMÁTICA

Resumen

La calidad edáfica y la diversidad vegetal están estrechamente relacionadas y determinan el funcionamiento y la estabilidad de los ecosistemas. En suelos degradados la rehabilitación mediante zanjas-bordo favorece la recuperación de funciones del suelo y de la diversidad vegetal. Los relictos de bosque y la estacionalidad climática permiten evaluar la resiliencia del suelo frente a la degradación. Por lo cual el objetivo del presente estudio fue analizar la relación entre la calidad edáfica y la diversidad vegetal en suelos en proceso de rehabilitación mediante zanjas-bordo, tepetate (suelo degradado) y en un relikto de bosque durante los periodos de lluvia y seca, utilizando el análisis de componentes principales (ACP), para identificar los principales atributos edáficos y biológicos asociados a la recuperación del suelo bajo condiciones estacionales. Se realizaron muestreos sistemáticos de suelo y vegetación en octubre de 2024 y febrero 2025, para su posterior análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos, así como el cálculo de índices de diversidad Shannon-Wiener y de Simpson (1-D), finalmente se realizó un ACP. Los resultados indicaron que los suelos relictos de bosque y en rehabilitación mediante zanjas-bordo presentan patrones contrastantes en función de la estacionalidad. En suelos con mayor materia orgánica, mejor estructura, mayor capacidad de intercambio catiónico y mayor actividad microbiana favorecen una mayor diversidad vegetal heterogénea como son las zanjas-bordo. En contraste, el relikto de bosque se mantiene resiliente ante el periodo seco, mientras que en los tepetates las condiciones de compactación, salinidad y pérdida de nutrientes limitan la diversidad aun con la variación estacional. Sin embargo, los suelos en proceso de rehabilitación aún no alcanzan las condiciones del relikto de bosque, lo que evidencia que estos sitios encuentran en una etapa intermedia de recuperación funcional.

Abstract

Soil quality and plant diversity are closely related and determine the functioning and stability of ecosystems. In degraded soils, rehabilitation using ditches promotes the recovery of soil functions and plant diversity. Forest relicts and climatic seasonality allow the resilience of soil to degradation to be assessed. Therefore, the objective of this study was to analyze the relationship between soil quality and plant diversity in soils undergoing rehabilitation using ditches, tepetate (degraded soil), and in a forest remnant during the rainy and dry seasons, using principal component analysis (PCA) to identify the main soil and biological attributes associated with soil recovery under seasonal conditions. Systematic soil and vegetation sampling was carried out in October 2024 and February 2025 for subsequent analysis of physical, chemical, and

biological parameters, as well as calculation of Shannon-Wiener and Simpson (1-D) diversity indices. Finally, PCA was performed. The results indicated that relict forest soils and soils undergoing rehabilitation through ditches systems exhibit contrasting patterns depending on seasonality. Soils with higher organic matter content, better structure, greater cation exchange capacity, and higher microbial activity favor greater heterogeneous plant diversity, such as that found in ditches systems. In contrast, the forest remnant remains resilient during the dry season, while in tepetate soils, compaction, salinity, and nutrient loss limit diversity even with seasonal variation. However, soils undergoing rehabilitation do not yet reach the conditions of the forest remnant, indicating that these sites are in an intermediate stage of functional recovery.

Palabras clave: índice de Simpson (1-D), índice de Shannon-Wiener, propiedades del suelo, zanjas-bordo, lluvia, seca

Keywords: Simpson index (1-D), Shannon-Wiener index, soil properties, ditches, rainfall, drought

Introducción

La calidad edáfica describe la capacidad de un suelo para sostener funciones ecológicas y productivas, tales como la provisión de agua y nutrientes, la regulación de procesos biogeoquímicos y el soporte físico para las plantas. Una alta calidad edáfica se relaciona con una estructura física favorable, un adecuado contenido de materia orgánica, disponibilidad de nutrientes y actividad biológica, factores que mantienen las funciones del ecosistema y servicios ambientales esenciales (Bünemann et al., 2018).

Esta capacidad del suelo se refleja directamente en la diversidad vegetal que se entiende como la variedad y abundancia relativa de especies en una comunidad, funcionando como uno de los principales indicadores de la salud y funcionalidad de los ecosistemas terrestres (Moreno, 2001). La presencia de diversas especies vegetales contribuye a la estabilidad del ecosistema, mejora la provisión de servicios ecosistémicos y está estrechamente relacionada con atributos del suelo, como la materia orgánica y la diversidad microbiana, que contribuyen la formación de agregados y el ciclo de nutrientes (Sánchez-González et al., 2016; Wu et al., 2024).

Sin embargo, en regiones volcánicas de México, como la que se presenta en el estado de Tlaxcala, los procesos erosivos han dejado descubiertos horizontes endurecidos conocidos como tepetates. Este material se caracteriza por su alta densidad, escasa porosidad y baja fertilidad, lo que limita la infiltración de agua, el desarrollo radicular y la disponibilidad de nutrientes, generando condiciones ambientalmente poco favorables para el establecimiento de vegetación (Gama-Castro et al., 2007; Velázquez-Rodríguez et al., 2022).

Para contrarrestar la degradación del suelo, la rehabilitación de estos suelos se enfoca en la recuperación de las funciones y procesos degradados, sin restablecer necesariamente la condición natural (Gardi et al., 2014). En este contexto, las zanjas-bordo, son obras de conservación que interceptan escorrentía y favorecen la infiltración de agua, han demostrado ser una práctica eficaz para reducir la erosión, mejorar la humedad del suelo y facilitar el establecimiento de vegetación, lo que promueve la recuperación de la diversidad vegetal en paisajes degradados (Doria Treviño et al., 2021; Reyes Carrillo et al., 2019)

Para tener como punto de referencia ecológica e hidrológica para evaluar los cambios en suelos y comunidades vegetales frente a áreas degradadas o en rehabilitación, se consideran los relictos de bosque que son fragmentos de ecosistemas originales que conservan estructuras, procesos y funciones ecológicas cercanos a los estados naturales (Jaroszewicz et al., 2019; Longo et al., 2024). En investigaciones ecológicas, los relictos permiten comparar la complejidad biológica y edáfica de ecosistemas bien conservados con aquellos degradados (Crouzeilles et al., 2016; Gatica-Saavedra et al., 2017).

De esta manera es importante determinar la interacción entre la estacionalidad climática, principalmente la precipitación, y la vegetación ya que determina la calidad y estabilidad del suelo, así como las funciones ecológicas que sostienen la resiliencia y productividad de los ecosistemas frente a la variabilidad estacional (Wu et al., 2023). Los periodos de precipitación determinan la disponibilidad de agua, regulan los procesos de mineralización de nutrientes y afectan la actividad de

organismos edáficos, influyendo así en la calidad del suelo y en la diversidad vegetal (Yu et al., 2022).

El objetivo del presente estudio fue analizar la relación entre la calidad edáfica y la diversidad vegetal en suelos en proceso de rehabilitación mediante zanjas-bordo, tepetate (suelo degradado) y en un relicto de bosque durante los periodos de lluvia y seca, utilizando el análisis de componentes principales, para identificar los principales atributos edáficos y biológicos asociados a la recuperación del suelo bajo condiciones estacionales.

Materiales y métodos

El área de estudio se localiza al sur del municipio de Tlaxcala, pertenece al área comunal del Cerro de San Gregorio en San Diego Metepec, a una altitud de 2,343 m.s.n.m. con coordenadas 19°16'26" N, 98°15'28" W. Los sitios (Figura 6) se caracterizan por 1) suelo en proceso de rehabilitación cuenta con 27 zanjas-bordo establecidas en 2021 en una superficie de 1,895.98 m², con dimensiones de 2.64 m × 0.68 m × 0.32 m con una capacidad de almacenamiento de agua de 570 litros por temporada, 2) el tepetate (suelo degradado) con una superficie de 2,070.02 m², se caracteriza por la ausencia total de vegetación y 3) relicto de bosque el cual alberga vegetación arbórea de *Pinus leiophylla* y *Cupressus lusitánica* en una superficie de 39,194.70 m².

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010, 2021) el suelo predominante es Cambisol, caracterizado por ser un suelo joven y poco desarrollado, que presenta cambios en su estructura, color y contenido de arcilla. El uso del suelo en la región es principalmente agrícola de temporal, sin embargo, de acuerdo con lo observado en los sitios se encuentra un relicto de bosque con especies de *Pinus leiophylla* y *Cupressus lusitánica*, así como zona de tepetate sin vegetación aparente, el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media con una precipitación media anual de 800 mm y temperatura media anual de 14 °C.

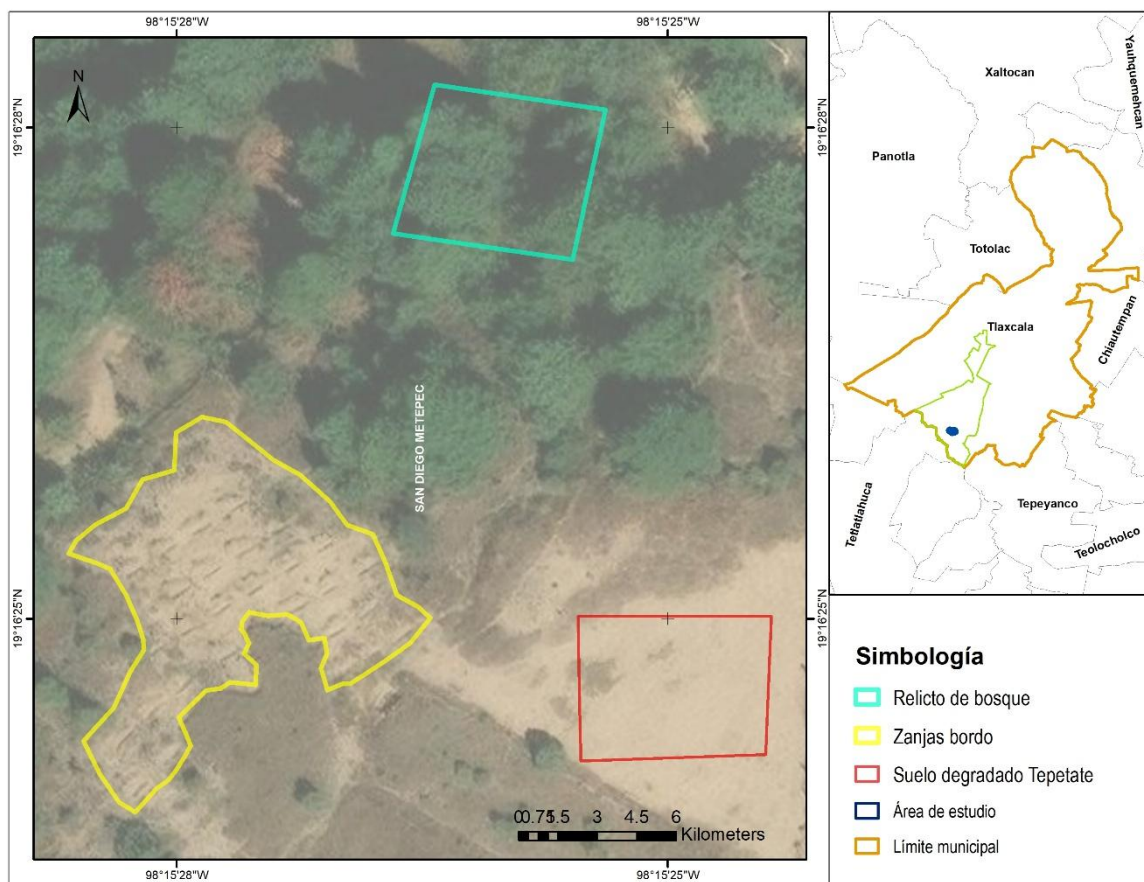


Figura 6. Localización de los tres sitios de estudio: suelo en rehabilitación (zanjas-bordo), tepetate (suelo degradado) y el suelo relicto de bosque en San Diego Metepec, Tlaxcala. Fuente: elaboración propia con información de INEGI.

Muestreo en los sitios

Se realizaron dos muestreos sistemáticos de acuerdo con Schweizer (2011), uno para cada periodo estacional (lluvia y seca), sobre las zanjas-bordo (suelo en proceso de rehabilitación), en el suelo relicto de bosque y tepetate (suelo degradado). Se seleccionaron aleatoriamente cinco de las 27 zanjas-bordo. Para el tepetate y el suelo relicto de bosque en un área de muestreo de 625 m², se trazaron cuadrantes de 5 x 5 m, se seleccionaron cinco cuadrantes al azar eliminando el efecto orilla.

Muestreo de suelo

Las muestras del suelo fueron simples al azar a una profundidad de 0-20 cm. De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002). Las muestras de suelos se secaron a temperatura ambiente y a la sombra sobre papel Kraft, posteriormente se tamizó con malla 2 mm de diámetro, para proceder a su análisis.

Análisis de los parámetros físicos, químicos y biológico

Las diferentes determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Física de Suelos y en el de Biotecnología Ambiental del Departamento de Enseñanza e Investigación en Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo.

Los parámetros físicos que se analizaron a las muestras fueron: densidad aparente (DA) (g cm^{-3}) con el método de la probeta de acuerdo con la NMX-FF-109-SCFI-2007, densidad real (DR) (g cm^{-3}) por el método del picnómetro y textura (%) por el método del hidrómetro de Bouyoucos de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 y porosidad (%) de acuerdo con Rodríguez & Rodríguez (2002).

Los parámetros químicos medidos fueron, pH relación 1:2 p/v, conductividad eléctrica (CE) (dS m^{-1}) por un conductímetro de la marca Conductronic CL35, materia orgánica (MO) (%) por el método de Walkley y Black; las bases intercambiables Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} (mg kg^{-1}); la determinación de capacidad de intercambio catiónico (CIC) ($\text{Cmol}[+] \text{kg}^{-1}$); fósforo extractable (P) (mg kg^{-1}) por el método de Bray y Kurtz 1 y nitrógeno inorgánico (%) por el método micro-Kjeldahl, todos los métodos, como lo especifica la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2000).

La respiración microbiana ($\text{mg C-CO}_2 \text{kg}^{-1}\text{suelo día}^{-1}$) fue el parámetro biológico medido a través de la incubación en medio cerrado (CO_2) de acuerdo con Paolini Gómez (2018).

Muestreo de vegetación

Para el muestreo de la vegetación se realizó mediante el método de cuadrantes de 1 x 1 m, de acuerdo con Mostacedo & Fredericksen (2000). Los ejemplares fueron recolectados mediante técnicas convencionales siguiendo los criterios de Lot & Chiang (1986). Cada ejemplar fue etiquetado en campo con información básica de fecha, número de colecta, número de individuos por especie y sitio, para cada periodo. Posteriormente fue herborizado, cada ejemplar fue prensado y secado.

Identificación de especies

Finalmente, la identificación de especies se realizó mediante el uso de claves taxonómicas especializadas, considerando la observación morfológica detallada, asimismo se tuvo de referencia la literatura florística regional y nacional, además de las bases de datos especializados como CONABIO-Enciclovida y con el apoyo de especialistas en el Herbario de la División de Ciencias Forestales y en el de la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. La validación taxonómica de la diversidad vegetal se realizó con el validador de taxonomía del SNIB-CONABIO (CONABIO, Comp., 2024).

Análisis de la diversidad vegetal

El procesamiento de los datos se realizó en Microsoft Excel, para cada unidad de muestreo se determinó la riqueza de especies, el número total de individuos y se calcularon los índices de diversidad alfa de Simpson (D) que determina el grado de dominancia de las especies mediante la Ecuación (1), así como su forma complementaria Simpson ($1-D$) establece la diversidad con la Ecuación (2), Shannon-Wiener (H') determinando el grado de equidad entre las especies Ecuación (3), los cuales permiten describir la estructura de la comunidad vegetal considerando tanto la riqueza como la equidad en la distribución de las especies .

Índice de Simpson

$$D = \sum p_i^2 \quad (\text{Ec.1})$$

$$1 - D = 1 - \sum (p_i)^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde: D = Índice de Simpson; p_i = Proporción de la especie i en la comunidad (n_i/N).

Para la interpretación del índice de Simpson Astudillo Sánchez et al. (2019) consideran de 0.01-0.33 baja dominancia y alta diversidad; de 0.34-0.66 dominancia y diversidad media; y mayor a 0.67 alta dominancia y baja diversidad.

Índice de Shannon-Wiener

$$H' = - \sum P_i * \ln (P_i) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde: H' = Índice de Shannon-Wiener; P_i = Abundancia relativa; $\ln (P_i)$ = Logaritmo natural de P_i .

La interpretación valor del índice de diversidad de Shannon-Wiener va de 0-1.35 diversidad baja; 1.36-3.5 diversidad media, y mayor a 3.6 diversidad alta (Astudillo Sánchez et al., 2019).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de correlación de Pearson y de componentes principales (ACP) mediante el software InfoStat versión libre 2020 (Di Rienzo et al., 2020) para determinar el grado de asociación de la diversidad vegetal con propiedades del suelo por sitio y periodo.

Resultados y discusión

Relación de la calidad edáfica con la diversidad vegetal

La matriz de correlación de Pearson evidenció asociaciones significativas entre los índices de diversidad vegetal y diversos parámetros edáficos físicos, químicos y biológico ($p < 0.05$). El índice de Shannon-Wiener y el de Simpson presentaron una correlación positiva con el pH ($r=0.93$ y $r=0.95$, respectivamente), así mismo una correlación negativa con la conductividad eléctrica ($r=-0.86$ y $r=-0.91$, respectivamente), indicando una respuesta diferencial de la diversidad vegetal ante las condiciones químicas del suelo.

Entre los parámetros físicos del suelo, la densidad aparente presentó una fuerte correlación negativa con la porosidad ($r=-0.92$), con la materia orgánica ($r=-0.92$), calcio (-0.94), capacidad de intercambio catiónico ($r=-0.97$) y positivamente con sodio ($r=0.85$), mientras que la porosidad se asoció positivamente con la capacidad de intercambio catiónico ($r=0.95$). La fracción arcilla se correlacionó positivamente con el potasio ($r=0.86$) y fósforo ($r=0.82$), y negativamente con arena (-0.89), y esta última mostró correlaciones negativas con fósforo ($r=-0.90$) y potasio ($r=-0.88$).

En los parámetros químicos el pH mostró una correlación negativa con la conductividad eléctrica ($r=-0.98$); por otro lado, la materia orgánica presentó una correlación positiva con el contenido de calcio ($r=1$) y CIC ($r=0.85$), pero correlación negativa con el contenido de sodio ($r=-0.93$), por su parte el calcio tuvo correlación positiva con CIC ($r=0.89$) y negativa con sodio ($r=-0.93$), así como asociaciones positivas entre el nitrógeno inorgánico y el limo ($r = 0.87$). El magnesio tuvo una correlación negativa con la respiración microbiana ($r=-0.83$).

El análisis de componentes principales (ACP) permitió identificar tres componentes con valores propios mayores a 1, los cuales explicaron de manera conjunta el 88 % de la varianza total del sistema (Cuadro 1). El primer componente principal (CP1) presentó un valor propio de 8.08, explicando el 43 % de la varianza total, lo que

indica que este componente concentra la mayor proporción de la información contenida en las variables analizadas.

Cuadro 1. Proporción de la variación explicada por cada componente principal.

Componente	Valor	Varianza total (%)	Varianza acumulada (%)
1	8.08	0.43	0.43
2	5.59	0.29	0.72
3	3.15	0.17	0.88

Fuente: elaboración propia.

El segundo componente (CP2) registró un valor propio de 5.59, aportando el 29 % de la varianza, y elevando la varianza acumulada al 72 %, mientras que el tercer componente (CP3) explicó un 17 % adicional, alcanzando una varianza acumulada del 88 %.

En conjunto, los primeros dos componentes explicaron una proporción considerable de la variabilidad del sistema, lo que sugiere que las principales relaciones entre los atributos edáficos y biológico pueden ser interpretadas a partir de estos componentes, mientras que los componentes restantes aportan información complementaria de menor magnitud.

El CP1, que explicó la mayor proporción de la varianza (Cuadro 2) y estuvo positivamente asociado con variables indicadoras de calidad edáfica y fertilidad del suelo, tales como arcilla (0.31), materia orgánica (0.33), calcio (0.33), potasio (0.30), capacidad de intercambio catiónico (0.34) y porosidad (0.30). En contraste, este componente presentó cargas negativas con la densidad aparente (-0.33) y el sodio intercambiable (-0.29) lo que sugiere que valores altos del CP1 se asocian con suelos estructuralmente más estables, menos compactados y con menor influencia de sales.

En conjunto, el CP1 puede interpretarse como un gradiente de calidad edáfica estructural, diferenciando suelos con mejores condiciones físicas y químicas que son característicos del relicto de bosque y zanjas-bordo los cuales son más funcionales que los suelos degradados. Asimismo, la estructura física condiciona la

disponibilidad de espacio y recursos para las raíces de las plantas, lo que repercute en la composición de especies, ya que el suelo selecciona aquellas especies con sistemas radicales capaces de sobrevivir a suelos con alta densidad aparente, menor porosidad y disponibilidad de agua y nutrientes (Giuliani et al., 2024; Polláková et al., 2021). Por consiguiente, este componente refleja la transición desde suelos con alta capacidad de retención y ciclado de nutrientes hacia aquellos con baja CIC y mayor vulnerabilidad a procesos de degradación (da Costa et al., 2020; Franzluebbers et al., 2025).

Cuadro 2. Cargas de las variables de suelo y diversidad vegetal en los tres primeros componentes principales.

Variables	CP1	CP2	CP3
Índice de Simpson 1-D	-0.03	-0.33	0.31
Índice de Shannon-Wiener	-0.03	-0.36	0.26
Densidad real	-0.2	0.27	0.21
Densidad aparente	-0.33	-0.02	0.14
Porosidad	0.30	0.15	-0.05
Arcilla	0.31	-0.07	0.24
Limo	-0.09	0.30	0.27
Arena	-0.26	-0.07	-0.35
pH	0.03	-0.36	0.26
Conductividad eléctrica	-0.06	0.39	-0.17
Materia orgánica	0.33	-0.11	-0.14
Calcio	0.33	-0.09	-0.13
Magnesio	0.14	0.33	0.06
Potasio	0.30	0.0042	0.14
Sodio	-0.29	0.0200	0.27
Capacidad de intercambio catiónico	0.34	0.09	-0.06
Fósforo	0.22	0.11	0.38
Nitrógeno inorgánico	0.01	0.27	0.33
Respiración microbiana	-0.08	-0.23	-0.19

Fuente: elaboración propia.

El CP2, resume la textura fina y la estacionalidad hídrica, destacando la conductividad eléctrica (0.39), el magnesio (0.33), nitrógeno inorgánico (0.27) y el limo (0.30). Por otro lado, presentó cargas negativas con el pH (-0.36), el índice de Shannon-Wiener (-0.33), índice de Simpson (1-D) (-0.36). y la respiración microbiana (-0.23). Puede interpretarse como un componente de calidad edáfica

vinculado a la redistribución de nutrientes y cationes, condicionado por la variación estacional de humedad, con aumentos en CE y magnesio que pueden coincidir con una menor diversidad vegetal y actividad microbiana, lo que sugiere una interacción dinámica entre fertilidad química y actividad biológica en suelos de pH ligeramente ácidos.

Este componente refleja principalmente la variabilidad estacional dentro de los sitios estudiados. Refleja un componente de dinámica microbiana, probablemente asociado a pulsos de disponibilidad de nutrientes, especialmente durante el periodo de lluvias, cuando la mineralización de la materia orgánica se intensifica (de Oliveira Lima et al., 2025; Jiang et al., 2021; Muñoz-Rojas et al., 2016).

Así como lo menciona Solanki et al. (2024) que la interacción entre pH, humedad, conductividad eléctrica, carbono orgánico del suelo y actividades enzimáticas regula la disponibilidad de nutrientes, al integrar procesos químicos y biológicos que determinan la capacidad del suelo para sostener comunidades vegetales diversas. De igual forma Omer et al. (2018) menciona que la medición de los parámetros del suelo tiene variabilidad con el periodo estacional.

Asimismo, el pH, fósforo, nitrógeno inorgánico y la actividad biológica determinan la capacidad del suelo para sostener comunidades vegetales heterogéneas. Es decir, la disponibilidad de nutrientes en el suelo regula la biomasa y la composición de especies, influyendo directamente en la diversidad funcional del ecosistema (Wu et al., 2024). Asimismo, Li et al. (2024) señalan que el nitrógeno y la materia orgánica son factores clave que condicionan la estructura de la comunidad vegetal y su diversidad funcional.

Por otro lado, el CP3 identificó una asociación positiva con el índice de Shannon-Wiener (0.43), pH (0.26) el fósforo (0.37) y nitrógeno inorgánico (0.33), mientras que presentó cargas negativas con la proporción de arena (-0.35). Este componente resume la calidad del suelo con la diversidad vegetal, en suelos con menor proporción de arena y baja conductividad eléctrica se presentan condiciones favorables de pH, fósforo y nitrógeno inorgánico con mayor diversidad vegetal.

En suelos más arenosos y con menor disponibilidad inmediata de nutrientes como fósforo y nitrógeno inorgánico, son condiciones típicas de ambientes con estrés edáfico o baja fertilidad (Wang & Kuzyakov, 2024). Y este se ve reflejado en la menor diversidad vegetal que indica comunidades vegetales menos complejas bajo estas condiciones (Liu et al., 2025).

La distribución de los tratamientos definido por los componentes principales confirma que la interacción sitio y periodo influyen en la distribución de estos patrones edáficos y de diversidad vegetal. En particular, los relictos de bosque en lluvia se asocian con suelos más fértiles y arcillosos, las zanjas-bordo en lluvia con suelos arenosos y ricos en nutrientes, el bosque en seca con condiciones intermedias y resilientes, y, por último, las zanjas-bordo durante el periodo seco con suelos arenosos y compactos, menos fértiles, pero con la capacidad de sostener diversidad vegetal moderada. Así mismo, el tepetate, a pesar del cambio estacional, no presenta las condiciones para el establecimiento de especies vegetales. Esto evidencia que la diversidad vegetal responde de manera simultánea a la calidad física y química del suelo. La asociación de los índices de Simpson (1-D) y de Shannon-Wiener confirma que la diversidad y la dominancia de las especies vegetales depende de esta interacción, de modo que la degradación del horizonte superficial del suelo, a través de la pérdida de nutrientes y agua, repercute negativamente en la diversidad, la riqueza y la productividad de la comunidad vegetal (Maciel et al., 2024).

Conclusión

La diversidad vegetal depende de la estructura física y la fertilidad química. Los relictos de bosque y las zanjas-bordo se diferencian según la estacionalidad, así mismo, los suelos con mayor materia orgánica, mejor estructura, mayor capacidad de intercambio catiónico y mayor actividad microbiana favorecen una mayor diversidad vegetal, mientras que condiciones de compactación y pérdida de nutrientes limitan la diversidad.

Estos resultados confirman que las zanjas-bordo son una estrategia efectiva de rehabilitación, al favorecer procesos edáficos asociados a la recuperación del suelo en ambientes degradados como el tepetate; sin embargo, su efecto está fuertemente influenciada por la estacionalidad y no se asemeja a las condiciones del relicto de bosque, lo que resalta la importancia de considerar la dinámica temporal en los procesos de restauración ecológica.

Literatura citada

- Astudillo Sánchez, E., Pérez, J., Troccoli, L., & Aponte, H. (2019). Composición, estructura y diversidad vegetal de la Reserva Ecológica Comunal Loma Alta, Santa Elena, Ecuador. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90(3), 1–25. <https://revista.ib.unam.mx/index.php/bio/article/view/2871/2017>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120(4), 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- CONABIO (comp.) 2024. Catálogo de autoridades taxonómicas de especies de flora y fauna con distribución en México. Validador de taxonomía SNIB-CONABIO, México. Consultado [11/02/2026] en <https://www.snib.mx/taxonomia/validacion/>
- Crouzeilles, R., Curran, M., Ferreira, M. S., Lindenmayer, D. B., Grelle, C. E. V., & Rey Benayas, J. M. (2016). A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success. *Nature Communications*, 7, 11666. <https://doi.org/10.1038/ncomms11666>
- da Costa, A. C. S., Junior, I. G. de S., Canton, L. C., Gil, L. G., & Figueiredo, R. (2020). Contribution of the chemical and mineralogical properties of sandy-loam tropical soils to the cation exchange capacity. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 44, 1–18. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200019>
- de Oliveira Lima, W. W., Francisco da Silva, E., Ferreira de Freitas, D., Cruz Portela, J., da Silva Rêgo, L. G., da Costa Leite Coelho, D., de Almeida Ferreira, E., Fernandes Gondim, J. E., de Sousa Antunes, L. F., Rodrigues de Oliveira, F. É., de Almeida Araújo, Y., Lima da Cunha, M., & Carantino Lucena Moreira, R. (2025). Visual soil assessment as an early indicator of soil quality in the caatinga dry tropical forest under varying degrees of disturbance in the Brazilian semiarid region. *Science of The Total Environment*, 967(4), 178846. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178846>

- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat* (versión 2020) [Software]. Centro de Transferencia InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. <https://www.infostat.com.ar>
- Doria Treviño, O. A., Mendoza Aguilar, D. O., Gutiérrez Gutiérrez, M., & Pando-Moreno, M. (2021). Efecto de una obra de conservación de suelo en el patrón de distribución de la vegetación y funcionalidad del ecosistema. *e-CUCBA*, (17), 229–237. <https://doi.org/10.32870/ECUCBA.VI17.230>
- Franzluebbers, A. J., Farmaha, B. S., Zentella, R., & Kafle, A. (2025). Soil-profile fertility is altered by soil texture and land use across physiographic regions in the southeastern United States. *Agronomy Journal*, 117(2), e70041. <https://doi.org/10.1002/agj2.70041>
- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., & 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. <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a11>
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M. L., Montanarella, L., Muñoz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M. I., & Vargas, R. (eds) (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg, 176. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1001699>
- Gatica-Saavedra, P., Echeverría, C., & Nelson, C. R. (2017). Ecological indicators for assessing ecological success of forest restoration: a world review. *Restoration Ecology*, 25(6), 850–857. <https://doi.org/10.1111/rec.12586>
- Giuliani, L. M., Hallett, P. D., & Loades, K. W. (2024). Effects of soil structure complexity to root growth of plants with contrasting root architecture. *Soil and Tillage Research*, 238, 106023. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2024.106023>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010. Tlaxcala, Tlaxcala. Clave geoestadística 29033. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/29/29033.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Diccionario de Datos Edafológicos* *Escala* 1:250 000. https://www.gslb.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463842644.pdf

- Jaroszewicz, B., Cholewińska, O., Gutowski, J. M., Samojlik, T., Zimny, M., & Latałowa, M. (2019). Białowieża Forest-A Relic of the High Naturalness of European Forests. *Forests*, 10(10), 849. <https://doi.org/10.3390/F10100849>
- Jiang, Z., Bian, H., Xu, L., Li, M., & He, N. (2021). Effects of pulse precipitation on soil organic matter mineralization in forests: spatial variation and controlling factors. *Journal of Plant Ecology*, 14(5), 970–980. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtab057>
- Li, W., Shen, Y., Wang, G., Ma, H., Yang, Y., Li, G., Huo, X., & Liu, Z. (2024). Plant species diversity and functional diversity relations in the degradation process of desert steppe in an arid area of northwest China. *Journal of Environmental Management*, 365, 121534. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121534>
- Liu, Y., He, M., Ye, H., & Hou, E. (2025). Contrasting responses of plant and soil microbial diversity to altered phosphorus supply. *Journal of Plant Ecology*, 18(4). <https://doi.org/10.1093/jpe/rtaf079>
- Longo, R. M., da Silva, A. L., Ribeiro, A. I., Gomes, R. C., Sperandio, F. C., & Nunes, A. N. (2024). Evaluating the Environmental Quality of Forest Remnants Using Landscape Metrics. *Sustainability*, 16(4), 1543. <https://doi.org/10.3390/su16041543>
- Lot, A., & Chiang, F. (1986). *Manual de herbario: Administración de colecciones, técnicas de recolección y preparación de ejemplares botánicos*. Consejo Nacional de la Flora de México, A.C.
- Maciel, M. G. R., Ramos, M. B., de Souza, S. M., da Cunha, S. S., de Faria Lopes, S., & de Souza, J. J. L. L. (2024). Water and nutrients mediate tree communities in the driest region of Caatinga. *Catena*, 242, 108107. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108107>
- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad* (Vol. 1). M&T–Manuales y Tesis SEA. <http://entomologia.rediris.es/sea>
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal* (D. Nash, Ed.). El País. <http://www.bio-nica.info/Biblioteca/Mostacedo2000EcologiaVegetal.pdf>
- Muñoz-Rojas, M., Erickson, T. E., Dixon, K. W., & Merritt, D. J. (2016). Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems. *Restoration Ecology*, 24, S43–S52. <https://doi.org/10.1111/rec.12368>
- Omer, M., Idowu, O. J., Ulery, A. L., VanLeeuwen, D., & Guldán, S. J. (2018). Seasonal Changes of Soil Quality Indicators in Selected Arid Cropping Systems. *Agriculture*, 8(8), 124. <https://doi.org/10.3390/agriculture8080124>

- Paolini Gómez, J. E. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana*, 36(1), 13–22. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V36I1.257>
- Polláková, N., Šimanský, V., & Jonczak, J. (2021). The Relationships of Texture and Hydrophysical Properties in Soil Profiles Under Selected Exotic Trees in the Context of Climate Change in Central Europe. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 244–252. <https://doi.org/10.12911/22998993/137677>
- Reyes Carrillo, A., Martínez Menez, M. R., Rubio Granados, E., García Moya, E., & Exebio García, A. A. (2019). Impact of the ditch check dam system over the vegetation coverage of grasslands in the Mixteca region, State of Oaxaca. *Revista Terra Latinoamericana*, 37(3), 231–242. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V37I3.327>
- Rodríguez, F. H., & Rodríguez, A. J. (2002). *Métodos de Análisis de Suelos y Plantas*. Trillas.
- Sánchez-González, A., Álvarez-Zúñiga, E., & López-Mata, L. (2016). Diversity and distribution patterns of ferns and lycophytes in a cloud forest in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 235–253. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.09.042>
- Schweizer, L. (2011). *Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria y Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José Costa Rica. 18 p. <https://www.inag.go.cr/bibliotecavirtual/p33-9965.pdf>
- Secretaría de Economía. (2008). NMX-FF-109-SCFI-2007 Humus de lombriz (lombricomposta)- Especificaciones y métodos de prueba. *Diario Oficial de la Federación*, 24. <http://economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2007/nmx-ff-109-scfi-2008.pdf>
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). NOM-021-SEMARNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*, 85. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-021-semarnat-2000/>
- Solanki, A. C., Gurjar, N. S., Sharma, S., Wang, Z., Kumar, A., Solanki, M. K., Kumar Divvela, P., Yadav, K., & Kashyap, B. K. (2024). Decoding seasonal changes: soil parameters and microbial communities in tropical dry deciduous forests. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1258934. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1258934>
- Velázquez-Rodríguez, A. S., Báez-Pérez, A., Hidalgo-Moreno, C., Parsa-Retana, M., Etchevers-Barra, J., & Paz-Pellat, F. (2022). Soil formation from tepetates:

- structural unities, organic carbon, and structural stability. *Revista Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V40I0.1447>
- Wang, C., & Kuzyakov, Y. (2024). Mechanisms and implications of bacterial–fungal competition for soil resources. *The ISME Journal*, 18(1). <https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae073>
- Wu, Y., Wang, P., Hu, X., Li, M., Ding, Y., Peng, T., Zhi, Q., Bademu, Q., Li, W., Guan, X., & Li, J. (2024). Plant Diversity, Productivity, and Soil Nutrient Responses to Different Grassland Degradation Levels in Hulunbuir, China. *Land*, 13(12), 2001. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/land13122001>
- Wu, Y., Yu, X., & Jia, G. (2023). Seasonal Variation of Soil Erodibility Under Vegetation Restoration in the Agro-pastoral Ecotone of Northern China. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2), 2331–2343. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01183-w>
- Yu, S., Sayer, E. J., Li, Z., Mo, Q., Wang, M., Li, Yingwen, Li, Yongxing, Xu, G., Hu, Z., & Wang, F. (2022). Delayed wet season increases soil net N mineralization in a seasonally dry tropical forest. *Science of The Total Environment*, 823(4), 153314. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153314>

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES

El suelo rehabilitado mediante la técnica de zanja-bordo mostró avances significativos en su calidad edáfica y en la diversidad vegetal en comparación con el tepetate sin rehabilitación. Las diferencias detectadas en las propiedades físicas, químicas y en la respiración microbiana evidencian mejoras en la funcionalidad del suelo, se encuentra una mejora ligera en cuanto a la proporción de arcilla, un pH moderadamente ácido a neutro, materia orgánica y fósforo, lo que refleja un impacto positivo en el proceso de rehabilitación del área.

A tres años del establecimiento de las zanjas-bordo, el suelo rehabilitado mostró cambios positivos, principalmente en el incremento del contenido de materia orgánica y fósforo, siendo más evidentes durante la época de lluvia debido al aumento de la humedad. El análisis de componentes principales permitió identificar que la densidad aparente, la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica, la proporción de arcilla y el contenido de calcio son variables determinantes en la calidad edáfica de los sitios evaluados, evidenciando un avance en el proceso de recuperación del tepetate rehabilitado en comparación con el tepetate sin intervención, tomando como referencia el suelo de relictos de bosque en el cerro de San Gregorio, Metepec, Tlaxcala.

El análisis de los índices de vegetación mostró que la diversidad vegetal fue mayor durante la temporada de lluvias en los suelos rehabilitados con zanjas-bordo, en comparación con el tepetate sin intervención. Se registró el establecimiento predominante de especies pioneras de las familias Asteraceae y Poaceae, las cuales permanecen durante la temporada seca y muestran tolerancia al estrés hídrico.

La estacionalidad influyó significativamente en la diversidad vegetal, observándose diferencias respecto al relictos de bosque. Las zanjas-bordo favorecen el establecimiento de vegetación y representan un proceso de recuperación por sucesión ecológica, con potencial para incrementar la diversidad y la presencia de distintos estratos en el tiempo. Es importante conservar el relictos de bosque como

referencia ecológica, ya que también presenta variaciones en su diversidad ante el cambio estacional.

El análisis de componentes principales evidenció una relación directa entre la calidad edáfica y la diversidad vegetal en los sitios evaluados. Los suelos con mayor contenido de materia orgánica, mejor estructura, mayor capacidad de intercambio catiónico y mayor actividad microbiana se asociaron con una mayor diversidad vegetal, mientras que condiciones de compactación y pérdida de nutrientes limitaron el establecimiento de especies.

Las zanjas-bordo son una estrategia efectiva de rehabilitación del suelo, al favorecer los procesos edáficos asociados a su recuperación en ambientes degradados como el tepetate; sus resultados están influenciados por la estacionalidad y no se asemejan a las condiciones del relicto de bosque.