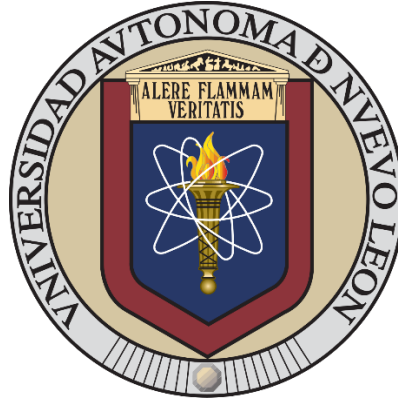


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



TESIS

**EVALUACIÓN DE OBRAS EN SUELOS DEGRADADOS Y
RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL MUNICIPIO DE
GALEANA, N.L.**

POR

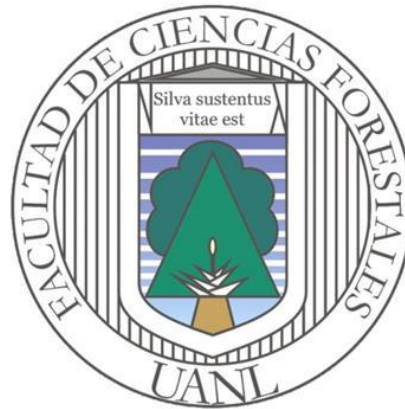
M.C. ANA MARISSA DE LA FUENTE SOLÍS

**COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:
DOCTORADO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

AGOSTO, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



TESIS

**EVALUACIÓN DE OBRAS EN SUELOS DEGRADADOS Y
RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL MUNICIPIO DE
GALEANA, N.L.**

POR
M.C. ANA MARISSA DE LA FUENTE SOLÍS

**COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:
DOCTORADO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

AGOSTO, 2025

**EVALUACIÓN DE OBRAS EN SUELOS DEGRADADOS Y
RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL MUNICIPIO DE
GALEANA, N.L.**

Aprobación de Tesis

M. Inés

Dra. María Inés Yáñez Díaz

Director

Eduardo

Dr. Eduardo Alanís Rodríguez

Co-director

Wibke

Dra. Wibke Himmelsbach

Asesor

Homero

Dr. Homero Alejandro Gárate Escamilla

Asesor

Israel Cantú Silva

Dr. Israel Cantú Silva

Asesor Externo

Julio, 2025

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, especialmente a mi madre Norma Delia Solís Castro: siempre has sido mi mayor impulso para continuar. Gracias por ser un ejemplo constante, por tu motivación y por brindarme las herramientas necesarias para crecer y superarme.

A mis hermanos Oscar Luis y Juan Manuel, por su constante respaldo y por cuidarme siempre con tanto cariño.

A la Familia Solís Sánchez, Treviño Solís y Solís Castro, por su apoyo continuo y su presencia en cada etapa. De manera especial, agradezco a mi tío Rodrigo Solís, cuyo respaldo hizo posible las salidas de campo.

A mis hermanas de vida, Miriam Cervantes y Ana Layda Medina, gracias por acompañarme en todo momento, aunque la distancia nos separe, su cercanía siempre me acompaña. Sin duda son las mejores amigas que la vida me pudo regalar.

A mis amigos incondicionales Camilo Jiménez, Luis David Ibarra y Manuel Ávila, gracias por siempre motivarme y darme ánimos para seguir adelante. A Samuel García, gracias por aparecer cuando menos lo esperaba y por apoyarme en todo momento.

A mi directora de tesis, la Dra. María Inés Yáñez Díaz, por su dirección, tiempo y valiosas observaciones. Al Dr. Eduardo Alanís Rodríguez, por su asesoría, observaciones y apoyo en la presente investigación y por haber hecho posible mi estancia de investigación en la Universidad de Alicante, mi más sincero agradecimiento. Al Dr. Israel Cantú Silva por sus aportaciones y sugerencias, siempre oportunas y constructivas. A la Dra. Wibke Himmelsbach por su observaciones y contribuciones que enriquecieron este trabajo. Al Dr. Homero A. Gárate Escamilla por su apoyo y revisión de esta tesis.

Al Dr. Arturo Mora Olivo por sus aportes en la identificación de especies y al Dr. Miguel Ángel Martín del Campo, por su apoyo y sus comentarios brindados.

A la Dra. Marisela Pando Moreno y a la Dra. Dinorah O. Mendoza Aguilar, por enseñarme sobre suelos cuando me sentía perdida. Aprendí mucho y disfruté cada clase, así como sus sabios consejos tanto académicos como personales.

Al Dr. Alejandro Valdecantos, gracias por darme la bienvenida en la Universidad de Alicante, por sus conversaciones enriquecedoras y por mostrarme nuevos caminos. Al Dr. Jordi Cortina Segarra por su apoyo y por sus valiosos consejos. Gracias por permitirme tomar sus clases y mostrarme otro panorama.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti), por el apoyo económico durante el desarrollo de esta investigación. A la Facultad de Ciencias Forestales, en especial al Laboratorio de Suelos, por facilitarme los recursos necesarios para llevar a cabo los análisis y hacer realidad el proyecto.

Al Dr. Cristian Martínez y a la Dra. Elisa Zaragoza por sus valiosos consejos y recomendaciones.

A los alumnos de maestría que participaron en las actividades de campo y al técnico de la FCF Guadalupe Pérez Malacara, por su valiosa colaboración.

A mis compañeros de posgrado, Cesar Ramos, gracias por tu disposición para aclarar mis dudas de una manera amable y comprensible. A Christian Chapa y Aldo Tovar por su apoyo y por ser excelentes compañeros de clase. A Rodolfo Mtz. por las pláticas, consejos y por el apoyo brindado en el laboratorio.

A Vanessa Uresti por hacer más llevaderos los días en el laboratorio y por tu amistad, a Vanessa Muñoz por esas pláticas y afinidades musicales y a Sara por tu apoyo incondicional en el laboratorio.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de manera directa e indirecta, me inspiraron, acompañaron y alentaron durante el desarrollo de esta tesis; mi más profundo agradecimiento.

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo constante en cada una de mis decisiones. A mis hermanos, por su cuidado incondicional y constante compañía. A mis sobrinos, por ser una fuente de alegría que ilumina mi vida. Y a Dios, por ser mi fortaleza constante y por colmarme de bendiciones que me han permitido llegar hasta aquí.

¿Qué sería la vida si no tuviéramos el valor de intentar algo nuevo?

- Vincent van Gogh

ÍNDICE

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	viii
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
HIPÓTESIS	4
OBJETIVO	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
CAPÍTULO I. EVALUACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS EN OBRAS DE CONSERVACIÓN EN EL MUNICIPIO DE GALEANA, NUEVO LÉON	5
Resumen.....	5
Abstract.....	7
1. Introducción	8
2. Materiales y métodos	10
2.1 Área de estudio	10
2.2 Beneficio de las obras de conservación	11
2.2.1 Zanjas trincheras o tinas ciegas.....	11
2.3 Selección de muestras	12
2.4 Propiedades del suelo.....	13
2.4.1 Físicas	13
2.4.2 Químicas	14
2.4.3 Hídricas	15
2.5 Caracterización de suelo.	16
2.5.1. Caracterización física.....	16
2.5.2. Caracterización química.....	18
2.5.3. Caracterización hídrica	20
2.6 Análisis estadísticos.....	21
3. Resultados	22

3.1 Propiedades físicas del suelo	22
3.1.1. Textura	22
3.1.2 Densidad aparente (DA).....	23
3.1.3 Porosidad total (P).....	24
3.2.4 Compactación (Resistencia mecánica a la penetración)	25
3.2.5 Estabilidad de agregados.....	25
3.2 Propiedades químicas del suelo	25
3.2.1 pH.....	25
3.2.2 Conductividad eléctrica (CE).....	26
3.2.3 Materia orgánica (MO)	26
3.2.4 Fósforo (P)	26
3.2.5 Nitrógeno total (NT)	27
3.3 Propiedades hídricas del suelo	27
3.3.1 Capacidad de campo (CC)	27
3.3.2 Punto de marchitez permanente (PMP).....	27
3.3.3 Agua útil (AU)	28
4. Discusión	28
4.1 Propiedades físicas.....	28
4.2 Propiedades químicas.....	29
4.3 Propiedades hídricas	30
CAPÍTULO II. RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE UN BOSQUE ARIDO TEMPLADO EN EL NORESTE DE MÉXICO.	34
Resumen.....	34
Abstract.....	36
1. Introducción	37
2. Materiales y métodos	38
2.1 Área de estudios.....	38
2.2 Obras de conservación (Zanjas trincheras y terrazas individuales).	38
2.3 Análisis de la regeneración natural	39
3. Resultados.....	45
3.1 Análisis de la regeneración natural	45
3.1.2 Diversidad.....	49
3.2 Supervivencia y crecimiento del Pinus cembroides Zucc.....	49

4. Discusión	51
4.1 Análisis de la regeneración natural	51
4.1.1 Composición arbórea	51
4.1.2 Abundancia	51
4.1.3 Dominancia	52
4.1.4 Frecuencia	52
4.1.5 Índice de Valor de Importancia.....	53
4.1.6 Riqueza específica.....	54
4.2 Supervivencia y crecimiento del Pinus cembroides Zucc.	54
CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especies encontradas en la plantación en el ejido La Taponá (ordenadas alfabéticamente).	45
Tabla 2. Especies ordenaron de manera descendente de acuerdo a su valor de IVI.	47
Tabla 3. Valores promedio y desviación estándar en los diferentes tratamientos, Zanjas trincheras (ZT) y Terrazas individuales (TI).	49
Tabla 4. Prueba de Mann-Whitney en altura, área de copa y área basal en los diferentes tratamientos, Zanjas trincheras y Terrazas individuales.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	11
Figura 2. Zanjas trincheras en el ejido La Tapona.....	12
Figura 3. Zanjas trincheras en el ejido San Lucas.....	12
Figura 4. Muestras de suelo secadas a temperatura ambiente.....	13
Figura 5. Medición de Textura del suelo.	16
Figura 6. Secuencia de fotos correspondientes a la determinación de densidad aparente.	17
Figura 7. Medidor de compactación de suelo marca AgraTronix.....	17
Figura 8. Medición de pH.....	18
Figura 9. Secuencia de fotos para la determinación de Materia orgánica.....	19
Figura 10. Determinación de Nitrógeno total mediante el método Kjeldahl (con el equipo Velp Científica-UDK159).....	19
Figura 11. Medición de fósforo.	20
Figura 12. Determinación de CC, PMP y AU.....	21
Figura 13. Valores medios del contenido de arena del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).	22
Figura 14. Valores medios del contenido de arcilla del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).	23
Figura 15. Valores medios del contenido de limo del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).	23
Figura 16. Valores medios del contenido de densidad aparente del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).	24
Figura 17. Valores medios del contenido de porosidad total del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).	24
Figura 18. Valores medios del contenido de pH del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).	25
Figura 19. Valores medios del contenido de materia orgánica del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).	26
Figura 20. Valores medios del contenido de nitrógeno total del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).	27
Figura 21. Ubicación del área de estudio.....	38
Figura 22. Zanjas trincheras y terrazas individuales en el ejido La Tapona.....	39
Figura 23. Localización de los 14 sitios de muestreo de 1000 m ²	40
Figura 24. Transectos de 50 m. para la determinación de la supervivencia y crecimiento del <i>Pinus cembroides</i>	43
Figura 25. Especies más abundantes en el presente estudio. a) <i>Pinus cembroides</i> , b) <i>Croton suaveolens</i> , c) <i>Mimosa texana</i> , d) <i>Dalea greggii</i> y e) <i>Brickellia veronicifolia</i>	46
Figura 26. <i>Juniperus monosperma</i> (Engelm.) Sarg.), especie con el valor mayor de IVI.	47
Figura 27. Especies con menor valor de IVI. a) <i>Atriplex</i> sp, b) <i>Cercocarpus fothergilloides</i> , c) <i>Agave scabra</i> , d) <i>Rhus pachyrrhachis</i> y e) <i>Berberis trifoliolata</i>	48

RESUMEN

El suelo es considerado un recurso natural no renovable en escalas de tiempo humano, vital en los ecosistemas terrestres, desempeña funciones críticas para la vida en el planeta, ya que cumple funciones importantes como el almacenamiento de agua, es clave en la regulación de los ciclos bioquímicos, la descomposición de la materia orgánica, el intercambio de gases, la provisión de nutrientes para las plantas y es el soporte físico para el desarrollo de la vegetación. Sin embargo, a pesar de su relevancia ecológica, las actividades antropogénicas, como la agricultura intensiva, la deforestación, el sobrepastoreo y el uso inadecuado del suelo, han contribuido de forma acelerada a su degradación. Ante esta problemática, se han implementado obras de conservación de suelos como practicas clave para mitigar los procesos de degradación, mejorar la calidad del suelo y fomentar la restauración ecológica. Las zanjas trincheras y las terrazas individuales destacan por su capacidad para retener agua, reducir la escorrentía superficial, disminuir la erosión y facilitar la infiltración, generando condiciones más favorables para la regeneración vegetal. Estas acciones, cuando se integran con prácticas de reforestación, pueden mejorar las condiciones edáficas y acelerar la recuperación del ecosistema. La presente investigación se desarrolló en el municipio de Galeana, Nuevo León, específicamente en los ejidos La Tapona y San Lucas, en la región de la Sierra Madre Oriental. Partiendo de la hipótesis de que las obras de conservación de suelo reducen la degradación del suelo y mejoran sus propiedades fisicoquímicas e hídricas, el objetivo general fue evaluar la composición florística y las propiedades edáficas en suelos con reforestación y con diferentes obras de conservación de suelos (zanjas trincheras y terrazas individuales) en la Sierra Madre Oriental. El estudio se dividió en dos capítulos, para el primero capítulo, se seleccionaron cinco sitios de muestreo: un sitio testigo sin obras de conservación (T) y cuatro sitios con zanjas trincheras de diferente antigüedad y ubicación (LT10d, LT10f, SL6d y SL6f). En cada sitio se delimitaron polígonos de 12x12 metros y se tomaron 25 muestras compuestas de suelo a una profundidad de 0-30 cm. Las muestras fueron analizadas según los métodos establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000 y Woerner (1989), evaluando propiedades físicas (textura, densidad aparente, porosidad total, resistencia mecánica a la penetración, estabilidad de agregados), propiedades químicas (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo, nitrógeno total) y propiedades hídricas (capacidad de campo, punto de marchitez permanente y agua útil). En el segundo capítulo, se evaluó la composición florística mediante el

establecimiento de 14 sitios de muestro de 1000 m² cada uno, registrando todos los individuos arbóreos y calculando el índice de valor de importancia (IVI). Asimismo, se determinó la supervivencia y crecimiento del *Pinus cembroides*, así como el diámetro basal y la altura total, para esto, se evaluaron 26 curvas a nivel (13 zanjas trincheras y 13 terrazas individuales) mediante un muestreo sistemático. En cuanto a las propiedades físicas: La densidad aparente fue mayor en el sitio testigo (1.22 g/cm³), indicando compactación del suelo, y menor en el sitio con zanjas trincheras de 10 años (0.76 g/cm³). La porosidad total fue mayor en SL6d (71.27%). Las texturas fueron variables. Además, la estabilidad de agregados fue alta o muy alta en todos los sitios con intervención. Respecto a las propiedades químicas, el contenido de materia orgánica fue mayor en el sitio LT10d (5.42%). El fósforo fue mayor en el testigo (15.7 mg/kg), mientras que el nitrógeno total se incrementó en los sitios conservados, especialmente en LT10d (0.31%). Las propiedades hídricas indicaron que la capacidad de campo y el agua útil fueron notablemente superiores en los sitios con zanjas trincheras (LT10d y LT10f), con valores de agua útil superiores al 15%, comparados con el testigo que registró un 5.85%. Por otra parte, en relación a la composición florística, se registraron 19 especies pertenecientes a 16 géneros y 13 familias. Las especies con mayor IVI fueron *Juniperus monosperma*, *Pinus cembroides* y *Mimosa texana*. La diversidad fue media según los índices de Margalef (2.51) y Shannon (2.07). Asimismo, la supervivencia y crecimiento de *Pinus cembroides* fue del 53.71% en zanjas trincheras y 51.68% en terrazas individuales. No se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, aunque las zanjas trincheras mostraron mejores condiciones edáficas. Los resultados sugieren que las obras de conservación, especialmente cuando se combinan con prácticas de reforestación, tienen un efecto positivo sobre la restauración de los suelos degradados y la regeneración del ecosistema forestal. Además, la composición florística registrada sugiere que los sitios restaurados mantienen una diversidad media, lo que representa un avance en la recuperación ecológica del ecosistema. En conjunto, estos hallazgos respaldan el uso de obras de conservación del suelo como una herramienta eficaz para restaurar suelos degradados en regiones semiáridas.

ABSTRACT

Soil is considered a non-renewable natural resource on human time scales, vital in terrestrial ecosystems. It performs critical functions for life on the planet, such as water storage, regulation of biogeochemical cycles, organic matter decomposition, gas exchange, nutrient provision for plants, and serving as a physical support for vegetation development. However, despite its ecological importance, anthropogenic activities—such as intensive agriculture, deforestation, overgrazing, and improper land use—have significantly contributed to its accelerated degradation. In response to this issue, soil conservation structures have been implemented as key practices to mitigate degradation processes, improve soil quality, and promote ecological restoration. Ditches and individual terraces stand out for their ability to retain water, reduce surface runoff, decrease erosion, and facilitate infiltration, thereby creating more favorable conditions for vegetation regeneration. When combined with reforestation practices, these actions can enhance soil conditions and accelerate ecosystem recovery. This research was conducted in the municipality of Galeana, Nuevo León, specifically in the communal lands (ejidos) of La Tapona and San Lucas, located in the Sierra Madre Oriental region. Based on the hypothesis that soil conservation works reduce soil degradation and improve its physicochemical and hydrological properties, the main objective was to evaluate the floristic composition and soil properties in reforested areas with different soil conservation structures (trench ditches and individual terraces) in the Sierra Madre Oriental. The study was divided into two chapters. In the first chapter, five sampling sites were selected: one control site without conservation works (T), and four sites with trench ditches of varying age and location (LT10d, LT10f, SL6d, and SL6f). In each site, 12x12-meter plots were defined, and 25 composite soil samples were collected at a depth of 0–30 cm. The samples were analyzed following the methods established in NOM-021-RECNAT-2000 and Woerner (1989), assessing physical properties (texture, bulk density, total porosity, mechanical resistance to penetration, aggregate stability), chemical properties (pH, electrical conductivity, organic matter, phosphorus, total nitrogen), and hydrological properties (field capacity, permanent wilting point, and available water). In the second chapter, floristic composition was evaluated by establishing 14 sampling sites, each 1000 m², where all tree individuals were recorded and the Importance Value Index (IVI) was calculated. Additionally, the survival and growth of *Pinus cembroides* were assessed by measuring basal diameter and total height across 26 contour lines (13 trench ditches

and 13 individual terraces) using a systematic sampling method. Regarding physical properties: Bulk density was highest at the control site (1.22 g/cm³), indicating soil compaction, and lowest at the 10-year-old trench ditch site (0.76 g/cm³). Total porosity was highest in SL6d (71.27%). Textures varied among sites. Aggregate stability was high to very high at all intervened sites. For chemical properties, organic matter content was highest in LT10d (5.42%). Phosphorus levels were highest at the control site (15.7 mg/kg), while total nitrogen increased in the conserved sites, especially LT10d (0.31%). Hydrological properties showed that field capacity and available water were significantly higher in trench ditch sites (LT10d and LT10f), with available water values exceeding 15%, compared to the control site, which recorded 5.85%. As for floristic composition, 19 species belonging to 16 genera and 13 families were recorded. The species with the highest IVI were *Juniperus monosperma*, *Pinus cembroides*, and *Mimosa texana*. Diversity was classified as medium based on the Margalef (2.51) and Shannon (2.07) indices. Additionally, *Pinus cembroides* had a survival rate of 53.71% in trench ditches and 51.68% in individual terraces. No significant differences were found between treatments, although trench ditches showed better soil conditions. The results suggest that soil conservation structures, especially when combined with reforestation, have a positive effect on the restoration of degraded soils and the regeneration of forest ecosystems. Moreover, the recorded floristic composition indicates that the restored sites maintain a medium level of diversity, representing progress in the ecological recovery of the ecosystem. Overall, these findings support the use of soil conservation structures as an effective tool for restoring degraded soils in semi-arid regions.

INTRODUCCIÓN

El suelo constituye un componente fundamental para el sostenimiento de la vida en el planeta. Además de ser el soporte principal para la vegetación, la infraestructura y los hábitats de la biodiversidad, juega un papel vital en el funcionamiento de cualquier ecosistema. Asimismo, desempeña un papel relevante en la regulación del clima, ya que después del océano, representa el segundo mayor reservorio de gases de efecto invernadero como el carbono (Hoth, 2015; SEMARNAT, 2018). Cabe destacar que el suelo es un recurso limitado que forma parte del capital natural de un país. Aunque su formación es continua, la velocidad de este proceso es tan lento que, en la escala del tiempo humano, se considera un recurso natural no renovable (Avalos *et al.*, 2007; Cardoza *et al.*, 2007). No obstante, a pesar de ser un pilar de gran parte de la economía agrícola mundial y de la biodiversidad, el suelo enfrenta un deterioro significativo, debido principalmente al crecimiento poblacional y por patrones de consumo y producción global insostenibles (SEMARNAT, 2018).

En este contexto, los bosques se presentan como ecosistemas que albergan una amplia diversidad biológica y cuya adecuada gestión es esencial para prevenir y evitar la pérdida de importantes áreas forestales de gran valor ecológico. Por ello, la implementación de prácticas de conservación y aprovechamiento sostenible resulta crucial para su prevención (Aguirre-Calderón, 2015).

La biodiversidad abarca toda la gama de diversidad natural, es indispensable para el mantenimiento del equilibrio ecológico. Además, provee una serie de servicios ambientales esenciales, de los cuales los seres humanos obtienen múltiples beneficios (Núñez *et al.*, 2003).

Uno de los procesos que más afecta el suelo es la erosión, entendida como el desgaste, transporte y depósito de materiales terrestres. Se considera la causa más significativa de degradación del suelo y, por lo tanto, tiene un impacto en el uso agrícola sostenible de la tierra. El suelo puede ser erosionado principalmente por el viento y el agua (Kouli *et al.*, 2009; SEMARNAT, 2018).

La calidad del suelo abarca parámetros físicos, químicos y biológicos, cuyas interacciones reflejan su estado de salud. Para una evaluación integral, es necesario medir todos estos parámetros, aunque su relevancia puede variar según el tipo de suelo y las condiciones específicas (Luters *et al.*, 2000). Las preocupaciones actuales por la degradación del suelo se derivan de la pérdida y deterioro de

la calidad de los servicios ambientales que este provee, siendo los más importantes la producción de alimentos y el uso y captación del agua (SEMARNAT, 2018).

Ante esta problemática, se han implementado diversas medidas ambientales para restaurar y mejorar la calidad del suelo y reducir los procesos de erosión. Sin embargo, ciertas prácticas carecen de una evaluación eficiente, por lo que su aplicación suele ser automatizada, sin considerar indicadores que permitan su adaptación a diferentes condiciones sociales y ambientales (Cotler *et al.*, 2015).

En México, el gobierno federal ha promovido durante décadas prácticas mecánicas de conservación de suelos (Cardoza *et al.*, 2007; Cotler *et al.*, 2015). Por ello, es de suma importancia contar con información actualizada y confiable sobre sus características, estado, formación y procesos de degradación (Gardi *et al.*, 2014). Así mismo, evaluar las diferentes prácticas de conservación aplicadas en suelos degradados permitirá identificar ciertas condiciones ambientales específicas y, con ello, determinar su vida útil y efectividad.

En este contexto, surge la necesidad de generar conocimiento que permita evaluar la efectividad de las prácticas de conservación implementadas en diferentes regiones del país. Por ello, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la compasión florística y las propiedades edáficas en suelos con reforestación y con diferentes obras de conservación de suelos, específicamente zanjas trincheras y terrazas individuales, en la Sierra Madre Oriental. Esta evaluación permitirá identificar el impacto de dichas prácticas en la recuperación del suelo y la vegetación, aportando información clave para mejorar las estrategias de manejo en zonas degradadas.

JUSTIFICACIÓN

El suelo es un recurso natural finito y no renovable en escala de tiempo humano. Es fundamental para el equilibrio ecológico y proporciona diversos servicios ambientales, como la producción agrícola, regulación del clima y la provisión de servicios ecosistémicos. Su calidad depende de propiedades físicas, químicas y biológicas que determinan su capacidad para retener agua, almacenar nutrientes, sostener la vida vegetal y regular procesos hidrológicos. No obstante, su integridad se ha visto comprometida por diversas prácticas agrícolas inadecuadas, que han provocado su degradación, lo que compromete su funcionalidad ecológica.

En respuesta a esta problemática, en las últimas décadas se han implementado en el país diversas estrategias de restauración enfocadas a la mejora y conservación de suelos. Entre ellas destaca la implementación de obras mecánicas, como zanjas trincheras o tinajas ciegas y terrazas individuales. Las zanjas trincheras ayudan a reducir la longitud del recorrido de agua, captan agua, disminuyen la erosión, promueven la producción de biomasa y se utilizan en procesos de reforestación en áreas degradadas. Por su parte, las terrazas individuales permiten retener el agua de los escurrimientos superficiales, aumentando así la humedad del suelo disponible para las plántulas.

Cuando estas prácticas se combinan con la reforestación, pueden acelerar la recuperación de las propiedades físicas, químicas e hídricas del suelo, además de favorecer el restablecimiento de especies vegetales nativas y mejora la estructura y funcionalidad del ecosistema.

La hipótesis de la presente investigación plantea que las obras de conservación del suelo reducen la degradación del mismo y mejoran sus propiedades edáficas. Por ello, el estudio se enfoca en evaluar la composición florística y las propiedades edáficas en suelos intervenidos con prácticas de reforestación y diferentes tipos de obras de conservación, en el municipio de Galena, Nuevo León.

El conocimiento generado contribuirá al fortalecimiento de políticas públicas y los programas de manejo, ya que la implementación de estas prácticas no siempre va acompañada de una evaluación integral de su impacto edáfico.

HIPÓTESIS

Las obras de conservación de suelo reducen la degradación del suelo y mejoran las propiedades fisicoquímicas e hídricas del mismo.

OBJETIVO

Objetivo general

Evaluar la composición florística y las propiedades edáficas en suelos con reforestación y con diferentes obras de conservación de suelos (zanjas trincheras y terrazas individuales) en la Sierra Madre Oriental.

Objetivos específicos

- (1) Evaluar las propiedades físicas, químicas e hídricas en suelo con reforestación bajo el establecimiento de obras de conservación (zanjas trincheras).
- (2) Evaluar la composición y la diversidad de especies arbóreas en un sitio con reforestación.
- (3) Evaluar el efecto de las terrazas individuales y zanjias trincheras en la supervivencia y crecimiento de diámetro basal y altura total de *Pinus cembroides*.

CAPÍTULO I. EVALUACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS EN OBRAS DE CONSERVACIÓN EN EL MUNICIPIO DE GALEANA, NUEVO LEÓN

Resumen

El suelo constituye un componente esencial de los ecosistemas terrestres, ya que en él se llevan a cabo funciones clave el almacenamiento de agua y la regulación los ciclos biogeoquímicos. Aunque la formación de suelos puede requerir miles de años, su degradación, en muchos casos irreversible, puede ocurrir en lapsos significativamente más cortos. En la actualidad, la degradación del suelo representa una de las problemáticas más relevantes, ya que compromete la capacidad presente y futura de los suelos, provocado un deterioro de la calidad de los servicios ambientales que se obtienen de él. Por ello es muy importante la implementación de obras de conservación de suelos que contribuyan a restaurar su estructura y funcionalidad, así como a recuperar la cobertura forestal. La presente investigación se realizó en los ejidos La Tapona y San Lucas, pertenecientes al municipio de Galeana, Nuevo León. El objetivo principal fue evaluar las propiedades físicas, químicas e hídricas en suelo con reforestación bajo el establecimiento de obras de conservación (zanjas trincheras) comparando sitios con diferente antigüedad de intervención: 10 años (Ejido La tapona) y 6 años (Ejido San Lucas), comparadas con un testigo sin intervención. Para ello se tomaron 25 muestras compuestas de suelo, mediante un muestreo aleatorio, en cada sitio se realizaron polígonos de 12x12 metros, donde se sacaron las submuestras de cada uno de los sitios a una profundidad de 0-30 cm. Las muestras se analizaron conforme a los procedimientos de la NOM-021-RECNAT-2000 y Woerner (1989). Los resultados mostraron que, en cuanto a propiedades físicas, las texturas del suelo variaron entre franco arenosas, franco limosas, franco y arcillosas. La densidad aparente fue mayor en el testigo (1.22 g cm^{-3}) y el valor más bajo se presentó en LT10d (0.76 g cm^{-3}). Respecto a la porosidad total el valor más alto se registró en SL6d (71.27%), mientras que el más bajo correspondió al T (53.95%). Los sitios que presentaron mayor resistencia mecánica a la penetración fueron el T, LT10f y SL6f y la estabilidad de agregados fue de alta a muy alta en los diferentes sitios. Las propiedades químicas, mostraron que el pH varió de neutro a medianamente alcalino en todos los tratamientos, a su vez, la conductividad eléctrica fue baja en todos los tratamientos evaluados, lo que indica una salinidad escasa a muy escasa, además, reflejaron una mayor acumulación de materia orgánica y nitrógeno total en el sitio

LT10d, por el contrario, el fósforo fue mayor en el testigo. Las propiedades hídras mostraron una mayor capacidad de campo y agua útil en los sitios LT10d y LT10f, en contraste con los valores más bajos observados en el testigo. Estos resultados muestran que las zanjas trincheras, en combinación con la reforestación, mejoran las condiciones del suelo al reducir su degradación y favorecer su funcionalidad, especialmente cuando se mantienen a largo plazo.

Palabras clave: Degradación, propiedades fisicoquímicas, propiedades hídras, zanjas trincheras.

Abstract

Soil is a fundamental component of terrestrial ecosystems, as it performs critical functions as water storage and regulation of biogeochemical cycles. Although soil formation can take thousands of years, its degradation sometimes irreversible can occur in considerably shorter periods. Currently, soil degradation is one of the most pressing environmental issues, as it compromises the present and future capacity of soils, leading to a decline in the quality of the ecosystem services they provide. Therefore, the implementation of soil conservation practices is essential to restore soil structure and functionality, as well as to recover forest cover. The present research was conducted in the ejidos of La Tapona and San Lucas, located in the municipality of Galeana, Nuevo León. The main objective was to evaluate the physical, chemical and hydric properties in soil with reforestation under the establishment of conservation works (ditches) comparing sites with different age of intervention: 10 years (Ejido La tapona) and 6 years (Ejido San Lucas), against a non-intervened control site. The results showed that, in terms of physical properties, soil textures varied between sandy loam, silty loam, loam and clay. The bulk density was higher in the control site (1.22 g cm⁻³) and lowest in LT10d (0.76 g cm⁻³). Regarding total porosity, the highest value was recorded in SL6d (71.27%), while the lowest value was in the control site (53.95%). The sites with the highest mechanical resistance to penetration were the control, LT10f and SL6f. Aggregate stability ranged from high to very high across all sites. In terms of chemical properties, pH ranged from neutral to moderately alkaline in all treatments. Electrical conductivity was low across all sites, indicating very little salinity. The LT10d site showed greater accumulation of organic matter and total nitrogen, whereas phosphorus levels were higher in the control site. Hydrological properties revealed greater field capacity and available water content in the LT10d and LT10f sites, compared to lower values in the control. These results indicate that ditches, combined with reforestation, enhance soil conditions by reducing degradation and improving soil, especially when maintained over the long term.

Key words: Degradation, ditches, hydrological properties, physico-chemical properties.

1. Introducción

El suelo es un elemento esencial para la sociedad, cumple diversas funciones, es el medio para el desarrollo de las plantas, es regulador del régimen hídrico, además es un sistema trifásico compuesto por sólidos, líquidos y gases, a su vez, juega un papel vital en el funcionamiento de cualquier ecosistema (Jury, 2004; SEMARNAT, 2018). Principalmente está compuesto por fragmentos de roca madre desintegrada en partículas de diferentes formas y tamaños (arena, limo y arcillas), debido a procesos químicos, físicos y biológicos, a su vez, se compone de restos orgánicos de plantas, animales y microorganismos, así como de aire y agua (Thompson & Troeh, 2021).

La conservación de suelos es una de las principales estrategias para mejorar las propiedades del suelo, es el conjunto de prácticas aplicadas para promover y preservar la calidad edáfica, así como, garantizar la productividad agrícola y la sostenibilidad en áreas rurales (Zavala *et al.*, 2011).

Es importante recuperar el recurso suelo, ya que en las últimas décadas se ha degradado por diferentes acciones, tanto naturales como antropogénicas, como la agricultura, cambio de uso de suelo, ganadería y deforestación (Barrientos, 2013; United Nations Convention to Combat Desertification, 2022; Ureta *et al.*, 2024). La calidad del suelo se refiere a su capacidad para sustentar la producción vegetal y animal, regular el ciclo del agua, controlar las enfermedades de las plantas e insectos, y mantener la calidad del agua y del aire (Urinovsky *et al.*, 2021). Las propiedades físicas, químicas e hídricas juegan un papel primordial en su calidad, y la degradación de estas propiedades disminuye la capacidad del suelo, tanto actual como futuras para cumplir con estas funciones (Oldeman, 1988; Cotler, *et al.*, 2022)

En este contexto, en México, durante años se han implementado obras de conservación de suelos con el fin de cuidar, rehabilitar, evitar la degradación y erosión del mismo, así como recuperar la calidad y reducir el impacto de la pérdida del recurso (Cardoza *et al.*, 2007; Cotler *et al.*, 2015; García-Gallegos *et al.*, 2023).

La implementación de obras de conservación principalmente se da en zonas rurales (García-Gallegos *et al.*, 2023) como son los ejidos la Tapona y San Lucas en el municipio de Galeana, Nuevo León. Por ello, el objetivo de la investigación fue evaluar el impacto del establecimiento

de las obras de conservación (zanjas trincheras de 11 años y de 8 años) a través de las propiedades físicas, químicas e hídricas en un suelo degradado.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la Sierra Madre Oriental, dentro de la Subprovincia de la Gran Sierra Plegada, específicamente en los ejidos La Tapona y San Lucas, en el municipio de Galeana, Nuevo León.

El Ejido La Tapona se localiza en las coordenadas 24°42'30.79" N, 100° 06'13.97" O a 1945 msnm, con una superficie total de 6.13 ha, las obras de conservación se realizaron en el año 2013. El Ejido San Lucas se ubica en las coordenadas 24°59'38.89" N, 100° 13'51.58" O a 2245 a msnm, con una superficie total de 3.11 ha, las obras de conservación se realizaron en el año 2016. Y el Testigo se localiza en las coordenadas 24°42'26.58" N, 100° 06'25.99" O a 1985 msnm, con una superficie total de 4 ha (Figura 1).

El clima predominante es seco o árido templado BSok(x'), esto de acuerdo a la clasificación de Köppen. La temperatura media anual va de los 12° a los 18°C, los meses que presentan temperaturas más calientes son junio y julio con una media mensual de 21°C y los meses con temperaturas más frías son diciembre y enero con 14°C y 13°C; por el contrario, los meses de junio y septiembre presentan la mayor incidencia mensual de lluvia, con un rango de 65 a 94 mm; presenta una precipitación media anual entre 400 y 600 mm (INEGI, 1986; INEGI, 2021). Los suelos que predominan son regosoles calcáricos, phaeozem, kastanozems y leptosol con xerosoles calcáricos, también se presentan xerosoles háplicos; la vegetación predominante de la zona es bosque de coníferas (INEGI, 2014); la vegetación predominante de la zona es bosque de coníferas, con presencia de especies como el *Juniperus monosperma*, *Pinus cembroides*, *Mimosa texana*, *Croton suaveolens* y *Brickellia veronicifolia* (INEGI, 2014).

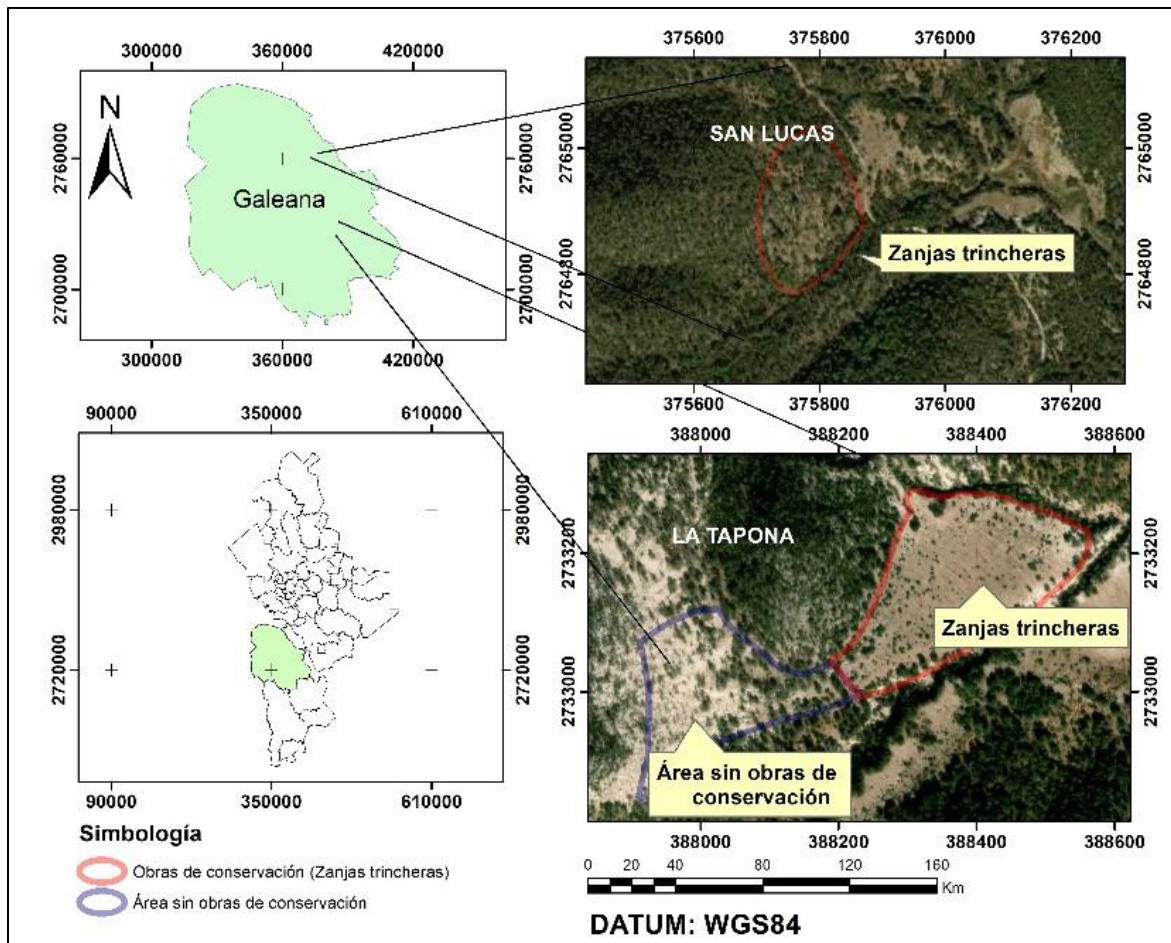


Figura 1. Localización del área de estudio.

2.2 Beneficio de las obras de conservación

Son prácticas mecánicas o manuales de conservación y restauración de suelos que contribuyen a reducir la degradación, principalmente la erosión. Estas técnicas facilitan la captación de agua de lluvia, propiciando la infiltración de agua, también la retención de suelos y sedimentos, así como el incrementar la humedad en el suelo, lo cual favorece el establecimiento de la vegetación forestal, asimismo, estas prácticas fomentan la generación de empleo en comunidades donde se implementan (Tejeda-Sartorius, 2017; Cardoza-Vázquez *et al.*, 2007).

2.2.1 Zanjas trincheras o tinas ciegas

En el área de estudio presentaron dimensiones de 0.5 m de ancho, 0.4 m de profundidad y aproximadamente 2.2 m de longitud, separadas por una distancia de 2 m (Figura 2), se construyen en un diseño a “tres bolillos”, para cubrir la mayor parte del área (Figura 3) (Cotler *et al.*, 2015).

Son obras utilizadas para reducir la longitud del recorrido de agua, captan el agua que escurre y disminuyen los procesos erosivos, a su vez favorecen la producción de biomasa, la reforestación en ambientes degradados y también ayudan a regular el agua de escorrentía en zonas urbanas (Cardoza-Vázquez *et al.*, 2007; Cotler *et al.*, 2015).



Figura 2. Zanjas trincheras en el ejido La Tapona.



Figura 3. Zanjas trincheras en el ejido San Lucas.

2.3 Selección de muestras

Se seleccionaron 3 sitios, Ejido La tapona, Ejido San Lucas y Testigo (Figura 1), en los cuales se tomaron 25 muestras compuestas de suelo, en cada sitio se realizaron polígonos de 12x12 m, donde se sacaron las submuestras de cada uno de los sitios, hasta obtener aproximadamente 1 kg de suelo, a una profundidad de 0-30 cm, mediante un muestreo aleatorio. En el Ejido La Tapona se tomaron

muestras tanto dentro (LT10d) de las zanjas trincheras como afuera de ellas (LT10f), al igual que en el Ejido San Lucas (SL6d y SL6f). En diciembre del 2022 se colectaron las muestras correspondientes al Ejido La Tapona y el Testigo y en diciembre del 2023 las muestras correspondientes al Ejido San Lucas. Las muestras trasladadas al laboratorio de suelos y nutrición de bosques de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), donde se procedió a su preparación y caracterización (Figura 4). Para ello, se aplicaron los procedimientos establecidos en el manual “Métodos químicos para análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas” propuesto por Woerner, (1989), así como los lineamientos técnicos contenidos en la NOM-021-RECNAT-2000 emitidos por la SEMARNAT, 2002.



Figura 4. Muestras de suelo secadas a temperatura ambiente.

2.4 Propiedades del suelo

2.4.1 Físicas

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de partículas minerales de distintos tamaños (arena, limo y arcilla), presentes en el suelo (FAO, 2009; Porta *et al.*, 2019). Esta característica se expresa en función del porcentaje que representa cada fracción. El parámetro se define en términos de la composición porcentual de arena, limo y arcilla. Según la clasificación USDA (United States Department of Agriculture), se considera arena a las partículas con un diámetro mayor a $>0,05$ mm; limo a las que se encuentra entre 0,05 y 0,002 mm y arcilla a aquellas cuyo tamaño es inferior a $<0,002$ mm (Marimón *et al.*, 1995; USDA, 1999; Noellemeyer *et al.*, 2021).

La densidad aparente se define como la masa por unidad de volumen (gr cm^{-3}), es el peso del suelo para un volumen determinado (USDA, 1999), aporta información sobre la compactación del suelo (de cada horizonte), a su vez tiene relación con el enraizamiento y la circulación del aire y del agua (Porta *et al.*, 2003; Mora & Lázaro, 2014). La compactación es el resultado de la aplicación de

cargas externas como maquinaria pesada y sobrepastoreo, y, en consecuencia, incrementa la densidad aparente y disminuye el volumen de poroso del suelo (Blanco-Sepúlveda, 2009).

Por otro lado, la porosidad total del suelo se refiere al volumen de espacios vacíos no ocupados por materia mineral y orgánica. Estos poros pueden contener aire, agua o ambos, y desempeñan un papel esencial en el intercambio de gases, retención de agua y el desarrollo radicular (Rucks *et al.*, 2004). La porosidad está conformada por la suma de macroporos y microporos, y sus características están fuertemente influenciadas por la textura y la estructura del suelo. (forma y disposición de los agregados) (Beltrán, 2018).

Los agregados son un conjunto estable de partículas primarias del suelo (arcilla, limo y arena) cohesionadas mediante compuestos orgánicos e inorgánicos como óxido de hierro, carbonato, arcillas o sílice), a su vez, uno de los principales agentes de unión es la materia orgánica (Meza & Geissert, 2006; Torres *et al.*, 2013). Los procesos físicos agrupan los agregados y los procesos biológicos y químicos los estabilizan (González *et al.*, 2004).

2.4.2 Químicas

El pH del suelo constituye un parámetro fundamental en la disponibilidad de nutrientes, ya que determina el grado de acidez o alcalinidad de la solución del suelo, midiendo la concentración del ion Hidrógeno (H^+). Este valor se expresa en una escala de 0 a 14, siendo crucial para los procesos biogeoquímicos que influyen en la fertilidad edáfica (Llorente, 2004; Cremona & Enriquez, 2020). Los suelos con pH 7 son considerados como neutros, menores a 7 son ácidos y superiores a 7 son básicos. De acuerdo al grado de acidez o alcalinidad, los micronutrientes o macronutrientes se concentran en ellos (USDA, 1999). La determinación de pH es fundamental para el correcto manejo de los suelos, ya que en ocasiones los suelos son sometidos a diversas actividades (aplicación de químicos, herbicidas o fertilizantes) con el fin de mejorar su calidad, sin embargo, en ocasiones, en lugar de ayudar ocasionan un impacto negativo, por lo cual, es importante monitorear y mantener un rango óptimo de pH para la disponibilidad de nutrientes (López-Aguilar, *et al.*, 2002; Ginés, & Mariscal, 2002).

La Conductividad eléctrica (CE), es una medida indirecta del contenido total de sales solubles en el suelo (USDA, 1999). Está estrechamente vinculado con la capacidad del suelo para suministrar agua y nutrientes a las plantas. Si bien, ciertas concentraciones salinas son necesarias para el

funcionamiento de algunos organismos del suelo, niveles excesivos pueden afectar negativamente el desarrollo vegetal al interferir con la absorción hídrica y la disponibilidad de nutrientes esenciales, los cuales pueden quedar inmovilizados al asociarse con sales (Fertirriego, 2009; Cremona & Enriquez, 2020).

La Materia orgánica (MO) representa un componente clave del suelo, está compuesta por residuos de origen vegetal y animal, productos resultantes de su descomposición, sustancias húmicas sintetizadas en el sistema edáfico y una gran diversidad de microorganismos (FAO, 2009; Quiroga & Bono 2012). Es considerada un indicador fundamental de la calidad del suelo y desempeña un papel determinante en su fertilidad, actuando como agente regulador de propiedades como la textura, el pH y la conductividad eléctrica (Julca-Otiniano, *et al*, 2006), también actúa como reserva principal de nutrientes, tanto macronutrientes como micronutrientes (Eguiarte, 2007; Aguirre, 2014).

El nitrógeno total (Nt) representa la cantidad total de nitrógeno contemplando las formas orgánicas e inorgánicas, normalmente del 97% al 99% se encuentra en formas orgánicas muy complejas, además el N es un macronutriente esencial para el crecimiento vegetal, involucrado en la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos y clorofila, normalmente del 97% al 99% se encuentra en formas orgánicas muy complejas (Martínez Marulanda, 2015).

El fósforo disponible (P) en el suelo se refiere a la fracción de este nutriente que se encuentra en formas químicas accesibles para su absorción y utilización por las plantas. El P constituye uno de los macronutrientes esenciales para los organismos, participando en procesos vitales como la transferencia de energía, la síntesis de ácidos nucleicos y el desarrollo estructural. Se puede presentar tanto en formas inorgánicas como orgánicas, cuya disponibilidad está condicionada por múltiples factores edáficos y ambientales, entre los que incluyen el pH del suelo, el contenido de humedad, la profundidad del perfil y la actividad de la microbiota edáfica (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2012; Aristizábal & Cerón, 2012).

2.4.3 Hídricas

La capacidad de campo se refiere al contenido de humedad, expresado en %, que permanece en el suelo después de que el exceso de agua gravitacional ha drenado libremente, lo cual se produce generalmente en un tiempo entre 24 y 48 horas después de un riego o una lluvia intensa. En este

estado, el suelo retiene el agua en sus poros por fuerzas capilares, y esta agua está disponible para la mayoría de las plantas (Singer & Munns, 1999; Requena & Toranzo, 2015).

Por otro lado, el punto de marchitez permanente es el nivel de humedad del suelo en el que las plantas ya no pueden extraer suficiente agua para satisfacer sus necesidades fisiológicas, lo que provoca que comiencen a marchitarse de manera irreversible, incluso si las condiciones ambientales mejora. El agua es retenida en el suelo con una fuerza superior a la capacidad de succión de las raíces, haciéndola inaccesible para las plantas (Singer & Munns 1999; Quiroga & Bono 2012).

La diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente se conoce como agua útil o agua disponible para las plantas, y representa el volumen de agua que puede ser absorbido efectivamente por las raíces para su desarrollo y crecimiento (Requena & Toranzo, 2015).

2.5 Caracterización de suelo.

2.5.1. Caracterización física

- Textura: La determinación de la composición granulométrica del suelo (arena, limo y arcilla) se llevó a cabo mediante el procedimiento del hidrómetro de Bouyoucos a través del método AS-09 de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).



Figura 5. Medición de Textura del suelo.

- Densidad aparente (DA): Se determinó por el método del cilindro (Woerner, 1989), se colectaron muestras inalteradas mediante cilindros metálicos de 5 cm de diámetro por 5 cm de longitud. Posteriormente las muestras se colocaron de 24 a 48 horas a 105°C en estufas de aire forzado.



Figura 6. Secuencia de fotos correspondientes a la determinación de densidad aparente.

- Porosidad total: Se obtuvo partiendo de los valores obtenidos de DA, asumiendo una densidad de partícula de 2.65 g cm^{-3} (Yáñez, 2017; Martínez, 2020).
- Compactación (Resistencia mecánica a la penetración): Se determinó directamente *in-situ* con un medidor de compactación de suelo marca AgraTronix, que evalúa la compactación a diferentes profundidades.



Figura 7. Medidor de compactación de suelo marca AgraTronix.

- Estabilidad de agregados: Se realizó *in-situ* (Siebe *et al.*, 1996). El método consiste en depositar aproximadamente 10 agregados de un diámetro entre 1 a 3 mm en una determinada capsula de porcelana y saturándolos con agua. Posteriormente para evaluar el grado de descomposición de los agregados, según la relación de Schlichting y Blume (1966), se hace rotar la capsula, con la palma de la mano, suavemente, durante un tiempo de 30 segundos.

2.5.2. Caracterización química

- Reacción del suelo (pH): Se determinó mediante el método AS-23 de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), utilizando una suspensión suelo: CaCl₂ 0.01 M en una proporción 1:2, medido a través de un electrodo de vidrio.



Figura 8. Medición de pH

- Conductividad eléctrica: Se evaluó mediante el método de determinación rápida en una suspensión suelo-agua 1:5 utilizado un conductivímetro (Woerner, 1989).
- Materia orgánica: Se cuantificó mediante el método de combustión humedad y titulación de Walkley/Black modificado conforme lo establecido por Woerner (1989).



Figura 9. Secuencia de fotos para la determinación de Materia orgánica.

- Nitrógeno total (Nt): Se analizó siguiendo el método Kjeldahl utilizando un sistema de digestión y destilación (Velp Scientifica-UDK159), conforme lo descrito por Bremner and Mulvaney (1982) en “Methods of soil analysis” part 2 – chemical and microbiological properties.



Figura 10. Determinación de Nitrógeno total mediante el método Kjeldahl (con el equipo Velp Scientifica-UDK159)

- Fósforo aprovechable: Se llevó a cabo por el método AS-10, mediante el procedimiento de Olsen y colaboradores (NOM-021-RECNAT-2000).



Figura 11. Medición de fósforo.

2.5.3. Caracterización hídrica

- La Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP) y Agua útil (AU) se determinó mediante la metodología de la olla de presión y membrana de presión a 1/3 atmosfera para CC y a 15 atmosferas de presión para PMP (Chicas *et al.*, 2014). Posteriormente se determina el contenido de humedad mediante una diferencia de peso a través de la técnica termogravimétrica (secado en horno). Estos parámetros se determinaron conforme el Método AS-05 de la NOM-021-RECNAT-2000, mediante gravimetría para el contenido de humedad del suelo (SEMARNAT, 2002). Con estos valores se calculará el agua disponible. La cual corresponde a la diferencia del contenido de humedad a CC y PMP, conocida como agua disponible para las plantas o agua útil.
- Las curvas de retención de humedad se obtuvieron mediante el método de placa de tensión y membrana de presión (SEMARNAT, 2002). Este método corresponde a la determinación de CC (0.3 atmosferas) y PMP (15 atmosferas), como valores base para la aplicación de la fórmula de Palacios (1963), la cual estima los contenidos de humedad a succiones de 0.5, 1.5, 5 y 10 atmosferas.



Figura 12. Determinación de CC, PMP y AU.

2.6 Análisis estadísticos

Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA), previamente, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianza (Levene). Para los datos que no presentaron una distribución normal, se aplicó una prueba no paramétrica (Kruskal-Wallis) y se consideraron significativas con un $p \leq 0.05$. Se utilizó la prueba U de Mann-Whitney para determinar si existían diferencias significativas entre los sitios de muestreo. Los análisis estadísticos se realizaron mediante el programa Statistical Package for Social Sciences (SPSS) para Windows (Inc., de Chicago, Illinois), con un nivel de confianza de $p \leq 0.05$ (SPSS, 2009).

3. Resultados

3.1 Propiedades físicas del suelo

3.1.1. Textura

La textura del suelo varió entre los sitios de estudio. El T presentó una textura franco arenosa, LT10d franco limoso, LT10f franca, y SL6d y SL6f arcillosa mostraron una textura. El sitio T registró la mayor concentración de arena, mientras que SL6d y SL6f presentaron los porcentajes más altos de arcilla, por último, el limo alcanzó los porcentajes más altos en el sitio LT10d. Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en las variables de textura. En cuanto al contenido de arena, el sitio T fue significativamente diferente al resto. En el caso de la arcilla, se observaron diferencias significativas entre los sitios T, LT10d y LT10f en comparación con SL6d y SL6f, por último, el limo presentó diferencias significativas entre T, LT10d y LT10f, mientras que SL6d y SL6f no presentaron diferencias entre sí.

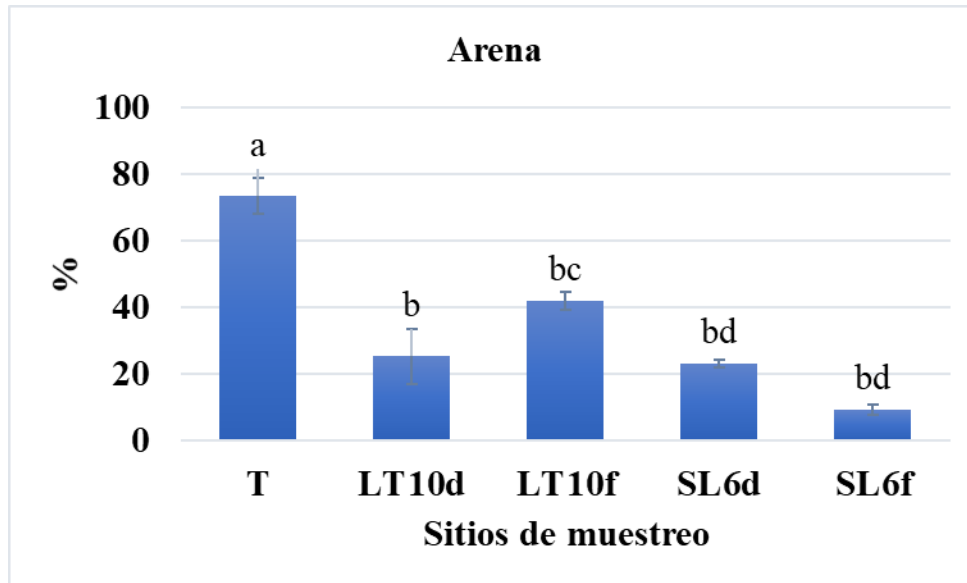


Figura 13. Valores medios del contenido de arena del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).

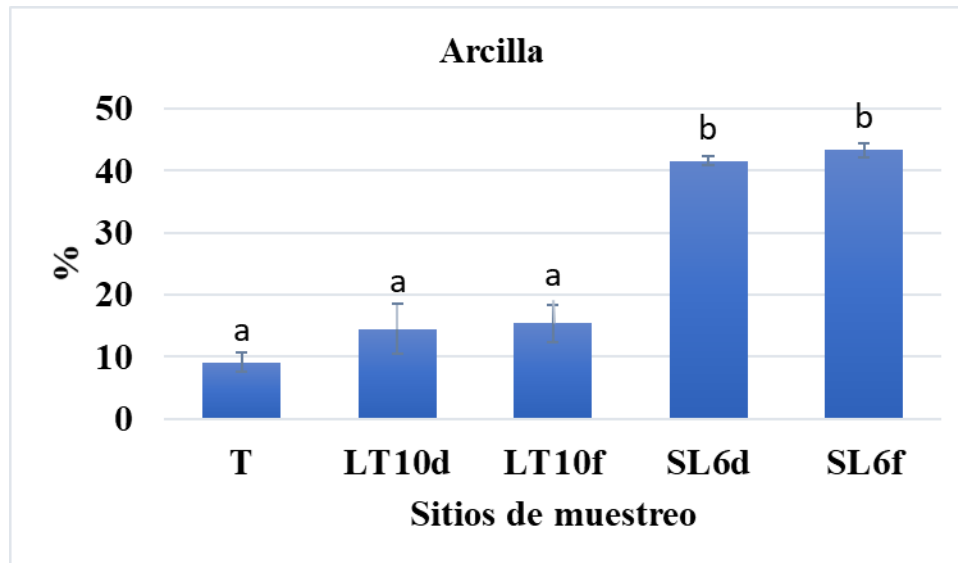


Figura 14. Valores medios del contenido de arcilla del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).

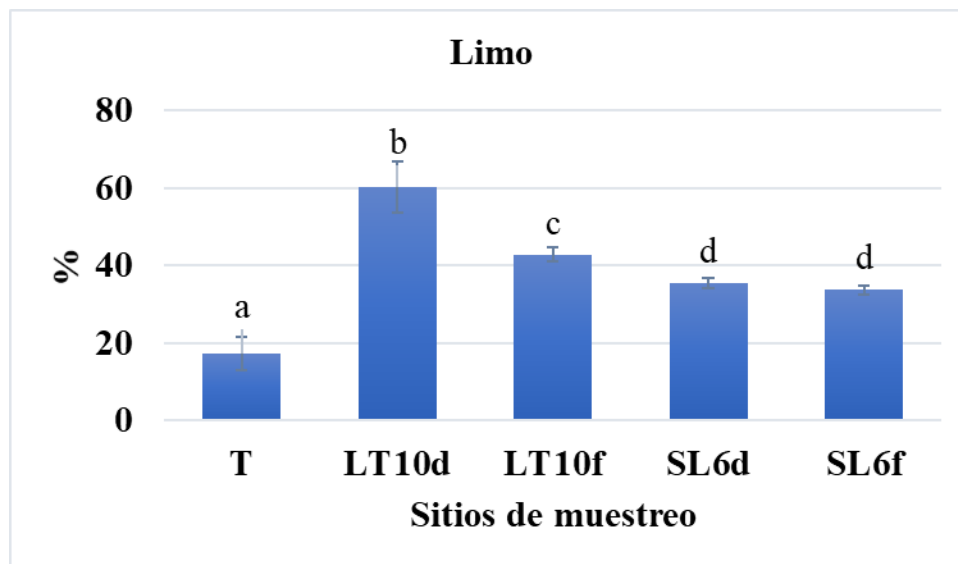


Figura 15. Valores medios del contenido de limo del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).

3.1.2 Densidad aparente (DA)

Los valores promedio de densidad aparente (DA) fueron los siguientes: T (1.22 g cm^{-3}), LT10d (0.76 g cm^{-3}), LT10f (1.11 g cm^{-3}), SL6d (0.93 g cm^{-3}) y en SL6f (0.95 g cm^{-3}). Se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$), entre el sitio T y todos los sitios intervenidos (LT10d, LT10f, SL6d y SL6).

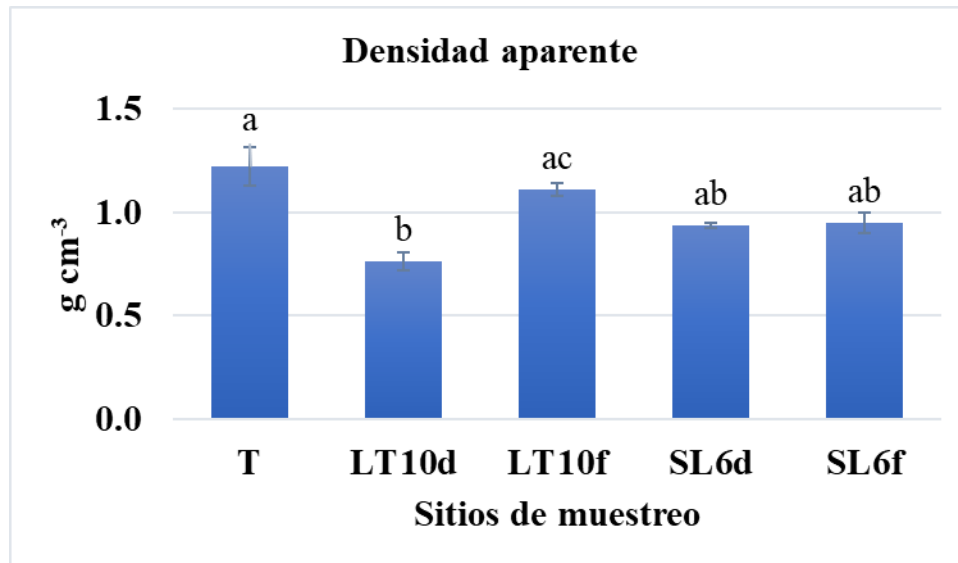


Figura 16. Valores medios del contenido de densidad aparente del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).

3.1.3 Porosidad total (P)

El valor más alto se registró en el sitio SL6d (71.27%), mientras que el más bajo correspondió al sitio T (53.95%). Se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$), entre el T y LT10f en comparación con los sitios LT10d, SL6d y SL6f.

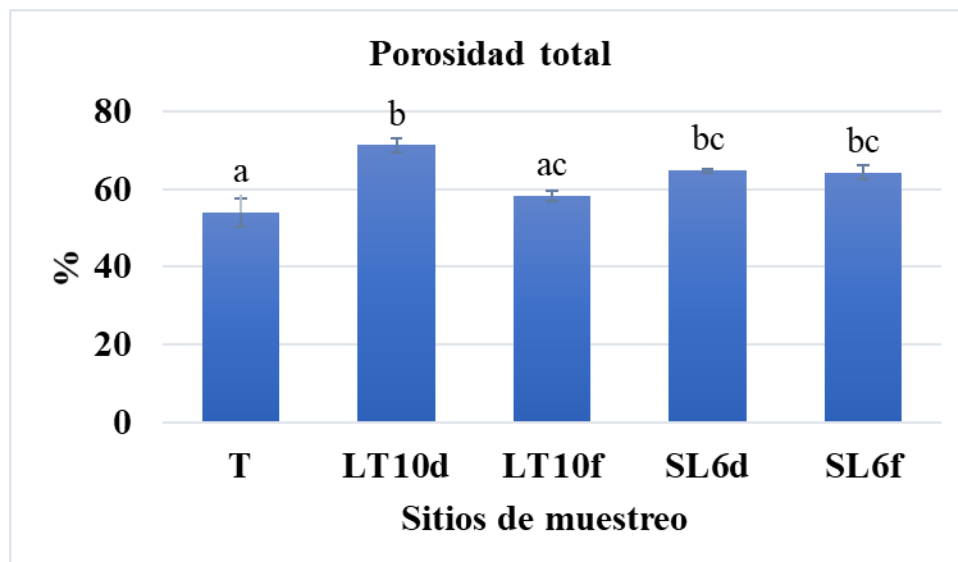


Figura 17. Valores medios del contenido de porosidad total del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).

3.2.4 Compactación (Resistencia mecánica a la penetración)

Los sitios que presentaron mayor resistencia fueron el T, LT10f y SL6f, con 0.345 kg cm^{-2} , 0.343 kg cm^{-2} y 0.359 kg cm^{-2} , respectivamente. Por el contrario, los sitios ubicados dentro de las zanjas trincheras (LT10d y SL6d), presentaron los valores más bajos de resistencia.

3.2.5 Estabilidad de agregados

La estabilidad de agregados fue clasificada como alta en él, mientras que en los sitios LT10d, LT10f, SL6d y SL6f se clasificó como muy alta.

3.2 Propiedades químicas del suelo

3.2.1 pH

El pH del suelo influye directamente en la disponibilidad de nutrientes, pudiendo facilitar o limitar su absorción por las plantas. El pH del suelo presentó los valores promedios de: T (7.11, neutro), SL6d (7.06, neutro), LT10d (7.38, medianamente alcalino), SL6f (7.42, medianamente alcalino) y LT10f (7.70, medianamente alcalino). El sitio LT10f presentó diferencias significativas en comparación con los demás sitios ($p \leq 0.05$). De acuerdo con Osorio (2012), valores de pH entre 6.5 a 8 pueden limitar la disponibilidad de fósforo (P). Estadísticamente, los sitios T y LT10d fueron similares entre sí, pero difirieron del resto.

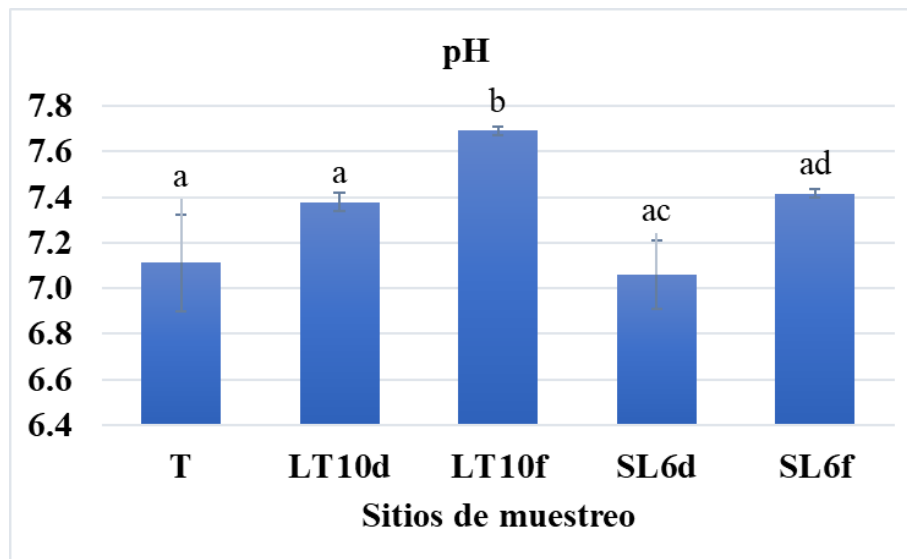


Figura 18. Valores medios del contenido de pH del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).

3.2.2 Conductividad eléctrica (CE)

La CE no presentó diferencias significativas entre los sitios muestreados, los valores más altos se registraron en LT10d (0.68 dS m⁻¹) y LT10f (0.57 dS m⁻¹), mientras que los más bajos se observaron en SL6d, SL6f y el T. En todos los sitios, los niveles de CE indican salinidad baja a muy baja.

3.2.3 Materia orgánica (MO)

Los porcentajes promedio de MO fueron: T (2.94%), LT10d (5.42%), LT10f (3.92%), SL6d (4.53%) y SL6f (3.81%). De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, el contenido de MO fue clasificado como medio en el sitio T y alto en el resto de los sitios (LT10d, LT10f, SL6d y SL6f). Se detectaron diferencias significativas entre los sitios ($p < 0.05$), sin embargo, para los sitios ubicados dentro de las zanjas trincheras (LT10d y SL6d) mostraron una mayor acumulación de MO y no presentaron diferencias significativas entre sí.

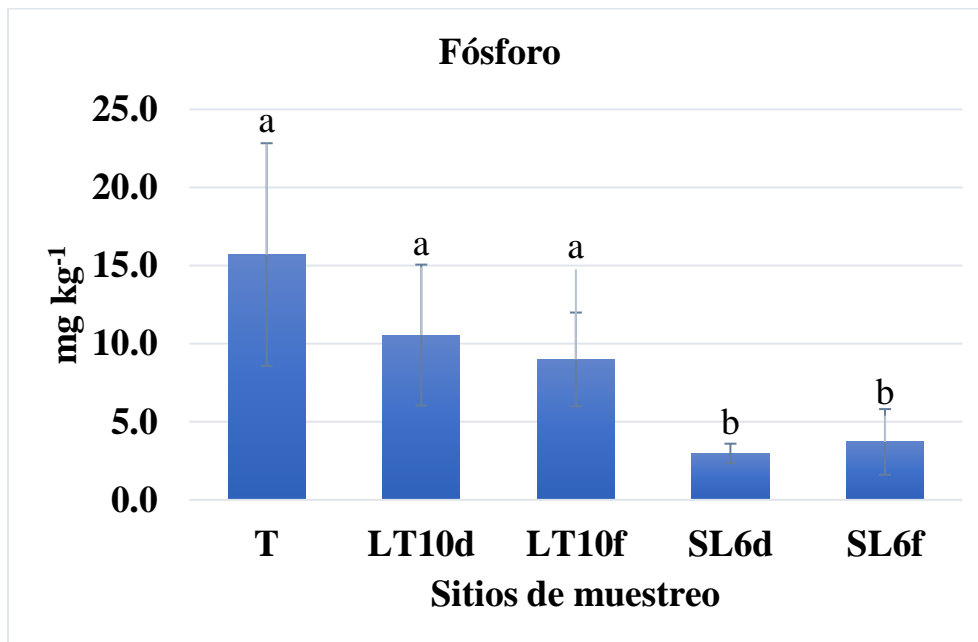


Figura 19. Valores medios del contenido de materia orgánica del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).

3.2.4 Fósforo (P)

El contenido de fósforo (P) presentó diferencias entre los sitios ($p \leq 0.05$). Los valores promedio fueron: T (15.70 mg K⁻¹), LT10d (10.55 mg K⁻¹), LT10f (8.99 mg K⁻¹), SL6d (2.98 mg K⁻¹)

y SL6f (3.71 mg Kg⁻¹). Según los criterios de la SEMARNAT (2000), el sitio T se clasifica con un contenido medio de P, mientras que el resto de los sitios presentan un contenido bajo.

3.2.5 Nitrógeno total (NT)

El contenido de nitrógeno total (NT) también mostro diferencias significativas entre los sitios ($p < 0.05$), los valores promedio fueron T (0.12%), LT10d (0.31%), LT10f (0.22%), SL6d (0.17%) y SL6f (0.22%).

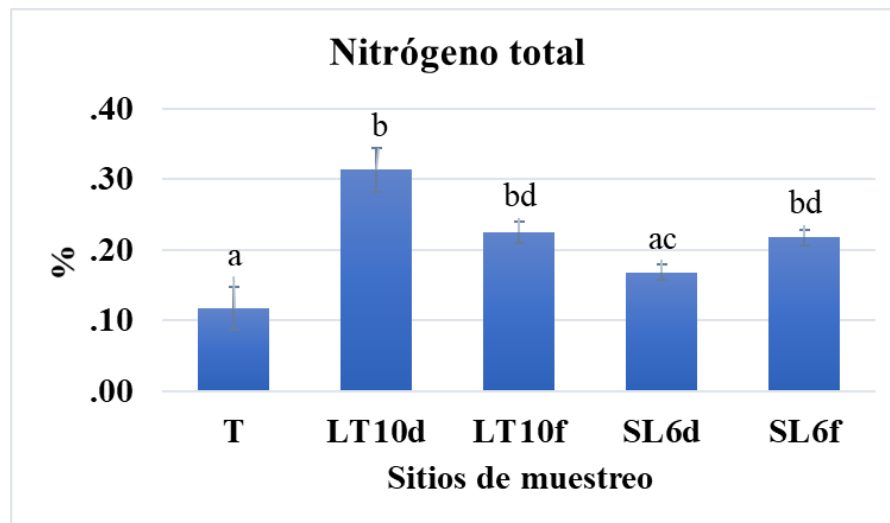


Figura 20. Valores medios del contenido de nitrógeno total del suelo en los sitios de muestreo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios ($p \leq 0.05$).

3.3 Propiedades hídricas del suelo

3.3.1 Capacidad de campo (CC)

El sitio T presentó valores significativamente distintos en comparación con los sitios LT10d, LT10f, SL6d y SL6f ($p \leq 0.05$). Los sitios LT10d y LT10f mostraron características similares entre sí, al igual que SL6d y SL6f. Los porcentajes promedio más altos se registraron en LT10d (37.94%) y LT10f (36.65%), mientras que el valor más bajo se observó en el T (15.91%).

3.3.2 Punto de marchitez permanente (PMP)

Los mayores porcentajes se obtuvieron en SL6d (25.90%) y SL6f (27.6%), por el contrario, el valor más bajo se presentó en el T. Todos los sitios mostraron diferencias significativas entre sí ($p \leq 0.05$).

3.3.3 Agua útil (AU)

El contenido de agua útil (AU) fue más bajo en el T (5.85%), seguido por SL6f (8.56%), SL6d (8.78%), LT10f (15.78%) y LT10d (16.18%). Los sitios T, SL6d y SL6f no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ellos ($p \leq 0.05$), sin embargo, si difirieron significativamente de LT10d y LT10f. Estos últimos sitios, con mayor tiempo de intervención y conservación, presentaron una mayor disponibilidad de AU para las plantas.

4. Discusión

4.1 Propiedades físicas

La textura del suelo es una propiedad física fundamental que influye en su comportamiento frente a procesos como la circulación de agua y la erosión. Esta característica está estrechamente relacionada con otros atributos del suelo como, la porosidad, la estructura, aireación y la fertilidad del suelo (USDA, 1999; Rucks *et al.*, 2004; Lacasta *et al.*, 2006). En el presente estudio, se observaron diferencias en la distribución de partículas (arena, limo y arcilla) entre los tratamientos T, LT10d y LT10f, con respecto a SL6d y SL6f, estas variaciones pueden atribuirse al tipo de suelo predominante en cada sitio, posiblemente relacionadas con el material parental, condiciones de relieve y procesos de formación del suelo diferentes y prácticas de manejo anteriores (Brady & Weil, 2017). Así mismo, la IUSS (2007), también señala que la variabilidad en la textura puede intensificarse por el uso histórico del suelo afectando sus propiedades físicas.

Una propiedad particularmente sensible al manejo es la DA, la cual fue significativamente menor en los tratamientos con zanjas trincheras (LT10d, LT10f, SL6d y SL6f) en comparación al T, indicando una menor compactación del suelo. Esta menor DA refleja una reducción en la compactación del suelo que promueve una estructura más suelta y porosa. Según Blanco-Sepúlveda (2009), la compactación disminuye el volumen de poros, mientras que una menor DA suele asociarse con una mayor porosidad total. Asimismo, Salamanca & Sadeghian (2006), reportaron valores promedio entre 0,58 y 1,46 g cm⁻³, en diferentes tipos de suelo, atribuyendo esta variación a diferencias en el material parental y al manejo del suelo.

En la presente investigación, los valores más favorables de DA (más bajos) y de porosidad total (más altos) se registraron en LT10d y SL6d, es decir, dentro de las zanjas trincheras, lo que sugiere

que estas estructuras contribuyen a una mejora progresiva de la estructura edáfica. Esta mejora puede estar relacionada con la reducción del disturbio mecánico, el incremento en el contenido de materia orgánica y el desarrollo de un sistema poroso continuo, que favorece tanto la infiltración de agua como el crecimiento radicular (Mendoza *et al.*, 2018; Porta *et al.*, 2003). García-Gallegos *et al.* (2023), mencionan que, al tener un mayor porcentaje de arena, la DA se incrementa, siendo similar en los tratamientos T y LT10f, esto debido a una mayor capacidad de infiltración y menor capacidad de retención. Esto resalta la influencia de la textura en la respuesta del suelo frente a las obras de conservación, especialmente fuera del área de influencia directa de las zanjas.

En relación a la estabilidad de agregados, esta fue clasificada de alta a muy alta en los diferentes tratamientos evaluados, lo cual puede estar relacionar con el contenido de materia orgánica, la cual actúa como agente cementante al favorecer la agregación de partículas minerales (Aguilera, 2000). Esto refuerza la idea de que las obras de conservación no solo disminuyen la erosión, sino que también mejoran la estabilidad estructural del suelo.

4.2 Propiedades químicas

En cuanto a las propiedades químicas, fundamentales para su fertilidad y capacidad productiva, también reflejaron variaciones importantes entre los tratamientos con zanjas y el testigo. De acuerdo a la valoración de Woerner (1989), el pH varió de neutro a medianamente alcalino en todos los tratamientos, lo cual es característico de suelos con baja acidez. Este rango de pH es característico de suelos en zonas semiáridas y si bien no implica restricciones severas para el desarrollo vegetal, puede limitar la disponibilidad de ciertos nutrientes como el fósforo (Osorio, 2012). La conductividad eléctrica fue baja en todos los tratamientos evaluados, lo que indica una salinidad escasa a muy escasa, esto sugiere un entorno edáfico no limitante para la absorción de agua, por ende, un ambiente no limitado para el desarrollo de las plantas.

Una propiedad particularmente importante fue el contenido de materia orgánica (%MO), Flores-Sánchez *et al.*, (2015) señalan que el contenido de MO está estrechamente relacionado con la estabilidad de agregados. Asimismo, Chaer *et al.*, (2009) y González-Irineo (2013) mencionan que un mayor %MO contribuye a la reducción de la DA. Esto autores coinciden con los resultados de la presente investigación, en la que los sitios LT10d y SL6d (ubicados dentro de las zanjas trincheras) presentaron los valores más altos de MO y los valores más bajos de DA. Estos resultados muestran que dentro de las zanjas trincheras se presentó una mayor acumulación de

MO, lo cual puede atribuirse a diversos factores, entre ellos la capacidad de las zanjas para retener materiales orgánicos por escorrentía, así como al microambiente protegido que ofrecen las obras, favoreciendo la descomposición y estabilización de residuos orgánicos. García-Osorio *et al.*, (2020), indica que conforme aumenta la edad de la reformación, también lo hace el contenido de hojarasca, lo cual favorece el aporte de materia orgánica al suelo a largo plazo.

Asimismo, la reforestación con *Pinus cembroides* en los sitios intervenidos podría estar contribuyendo con un aporte constante de hojarasca, enriqueciendo progresivamente la fracción orgánica del suelo (Reyes-Carrera *et al.*, 2013).

Respecto a los nutrientes, el fósforo mostró valores más altos en el T, posiblemente debido a una menor fijación en partículas finas o una menor inmovilización microbiana. Por el contrario, los niveles más bajos se encontraron en los tratamientos SL6d y SL6f, lo cual puede estar relacionado con una mayor retención en fracciones de arcilla o movilización por pH alcalino (SEMARNAT, 2000; Osorio, 2012)

Respecto al nitrógeno total se mostró una tendencia opuesta: los valores más altos se registraron en LT10d, seguido de LT10f y SL6d, mientras que el sitio T presentó el valor más bajo, esto puede atribuirse a la mayor acumulación de MO y actividad biológica en las zanjas, donde se promueve la fijación y reciclaje del N (Julca-Otiniano *et al.*, 2006). Es importante destacar que, de acuerdo con Gallegos *et al.*, (2023), la fijación de nitrógeno se ve favorecida en suelos con pH superior a 6. En este estudio, los tratamientos LT10d y LT10f presentaron valores de 7.38 y 7.70 respectivamente, lo cual refuerza esta interpretación.

4.3 Propiedades hídricas

Las propiedades hídricas del suelo, como la CC y PMP, mostraron claras diferencias entre el T y los tratamientos con obras de conservación (LT10d, LT10f, SL6d y SL6f). Estas diferencias pueden atribuirse tanto a la textura del suelo como al tiempo de implementación de las obras de conservación. De acuerdo con Saxton y Rawls (2006), la textura del suelo influye notablemente en su capacidad para retener agua, mencionan que suelos con textura franco arenosa presentan en promedio, una CC de 12% y un PMP de 5%, mientras que suelos con textura franca alcanzan valores de CC de 28% y PMP de 14%. En suelos franco limosos se reportan valores de CC de 31% y PMP de 11%, en suelos arcillosos, CC de 42% y PMP de 30%. En relación con esto, Garrido,

(1994), señala que los suelos con alto contenido de arena son muy permeables, y, por ende, con menor retención de agua, mientras que los suelos arcillosos, por su alta microporosidad, presentan una mayor capacidad de retención hídrica.

En este sentido, los tratamientos SL6d y SL6f, mostraron texturas predominantemente arcillosas, presentaron valores de CC y PMP relativamente altos, aunque ligeramente por debajo de los rangos teóricos (Saxton y Rawls 2006). Esto podría explicarse por factores como la compactación residual del suelo, los agregados, la estructura aun en desarrollo o variaciones en los porcentajes relativos de arena, limo y arcilla (Bronick y Lal, 2005). Además, es posible que el menor tiempo de implementación (6 años) haya sido insuficiente para alcanzar una estructura edáfica más favorable a la retención de agua.

Por el contrario, los tratamientos LT10d y LT10f, destacaron por presentar los valores más altos de agua útil, resultando de un equilibrio más favorable entre CC y PMP. Esta condición es ideal para el desarrollo vegetal, ya que asegura una mayor disponibilidad de agua para las plantas (Garrido, 1994). Esto resalta el efecto beneficioso de las zanjas trincheras en la retención y disponibilidad de agua, especialmente en suelos con texturas intermedias.

Además, el contraste entre los tratamientos de seis y diez años evidencia que el efecto de estas obras se puede intensificar con el tiempo, reforzando la necesidad de un enfoque de manejo sostenible a largo plazo.

CAPÍTULO II. RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE UN BOSQUE ARIDO TEMPLADO EN EL NORESTE DE MÉXICO.

Resumen

Los bosques, especialmente los áridos templados, deben gestionarse responsablemente debido a su diversidad de especies y la falta de información sobre su regeneración tras ser afectados por actividades productivas. El presente estudio se realizó en el municipio de Galeana, Nuevo León, en el ejido la tapona, con los objetivos de 1) analizar la composición y la diversidad de especies arbóreas en un área con reforestación y 2) evaluar el efecto de las terrazas individuales y zanjas trincheras en la supervivencia y crecimiento de diámetro basal y altura total de *Pinus cembroides*. Para el objetivo 1) se delimitaron 14 sitios de muestreo de 1000 m² y se documentó cada ejemplar presente. Para cada especie se calculó el índice de valor de importancia (IVI). Para el objetivo 2) se empleó un diseño de muestreo aleatorio sistemático en donde se seleccionaron 13 curvas a nivel de cada una de las obras de conservación (26 en total), mediante un muestreo sistemático aleatorio. En cada uno de los transectos se tomó información de todos los individuos, midiéndoles el diámetro a los 10 cm, la altura total (H) y la cobertura. Para determinar si existían diferencias significativas en la supervivencia de la especie con respecto a los diferentes tratamientos (terrazas individuales y tinas ciegas), se realizó un análisis de varianza utilizando la prueba *t* de Student y la prueba de U de Mann-Whitney. Se identificaron 19 especies, pertenecientes a 16 géneros y 13 familias. La familia con mayor número de representantes fue la Pinaceae, seguida de la Fabaceae y Euphorbiaceae. En contraste, las familias Anacardiaceae y Berberidaceae mostraron la menor representación. De acuerdo con el índice de valor de importancia (IVI), las especies con mayor importancia ecológica fueron: *Juniperus monosperma*, *Pinus cembroides*, *Mimosa texana*, *Croton suaveolens* y *Brickellia veronicifolia*. Por otro lado, las especies *Atriplex sp*, *Cercocarpus macrophyllus*, *Cercocarpus fothergilloides*, *Agave scabra*, *Vachellia constricta*, *Rhus pachyrrhachis* y *Berberis trifoliolata* registraron un IVI inferior a 1. La riqueza y diversidad de especies se calcularon utilizando el índice de Margalef (DMg = 2.51) y el índice de Shannon (H' = 2.07), lo que sugiere que el bosque posee un nivel intermedio de riqueza y diversidad de especies. El promedio general de supervivencia del *Pinus cembroides* fue de 52.69%, mientras que en las zanjas trincheras fue de 53.71%, y en las terrazas individuales se obtuvo el 51.68%. Sin embargo,

las pruebas determinaron la ausencia de diferencias significativas en las plántulas de las terrazas individuales y zanjas trincheras.

Palabras clave: Composición florística, IVI, Muestreo, Obras de conservación, Reforestación.

Abstract

Forests, especially temperate drylands, need to be managed responsibly because of their diversity of species and the lack of information on their regeneration after being affected by productive activities. The present study was carried out in the municipality of Galeana, Nuevo León, in the ejido La Taponá, with the following objectives: 1) to assess the composition and diversity of tree species in a reforested site within a temperate arid forest in northeastern Mexico, and 2) to estimate the survival rate of a ten-year-old *Pinus cembroides* plantation. To achieve the first objective, 14 sampling units of 1000 m² each were established, and all individual trees were recorded. For each species, the Importance Value Index (IVI) was calculated based on relative abundance, dominance, and frequency. For the achievement of objective 2) a systematic random sampling design was used in which 13 contour lines were selected from each of the conservation works (26 in total), in which information was recorded from all individuals by measuring their diameter at 10 cm, their total height (H) and their cover. To determine whether there were significant differences in the survival of specie in relation to the different treatments (individual terraces and ditches), an analysis of variance was performed using Student's t-test and the Mann-Whitney U-test. A total of 19 species, 16 genera and 13 families were recorded. The family with the highest number of representatives was Pinaceae, followed by Fabaceae and Euphorbiaceae. In contrast, the Anacardiaceae and Berberidaceae families showed the lowest representation. According to the Importance Value Index (IVI), the species with the greatest ecological importance were *Juniperus monosperma*, *Pinus cembroides*, *Mimosa texana*, *Croton suaveolens*, and *Brickellia veronicifolia*. On the other hand, the species *Atriplex* sp., *Cercocarpus macrophyllus*, *Cercocarpus fothergilloides*, *Agave scabra*, *Vachellia constricta*, *Rhus pachyrrhachis*, and *Berberis trifoliolata* recorded an IVI lower than 1. Species richness and diversity were calculated using the Margalef index (DMg = 2.51) and the Shannon index (H' = 2.07), suggesting that the forest possesses an intermediate level of species richness and diversity. The overall survival average of *Pinus cembroides* was 52.69%, while in blind pits was 53.71%, and individual terraces it was 51.68%. However, the tests showed that there were no significant differences between the seedlings of the individual terraces and ditches.

Key words: Floristic composition, IVI, Sampling, Conservation practices, Reforestation.

1. Introducción

Los bosques son ecosistemas que pueden sustentar una amplia diversidad de formas de vida, y su manejo adecuado es crucial para prevenir y evitar la degradación de extensas áreas (Torres-Rojo *et al.*, 2016). La aplicación de estrategias de conservación y uso sostenible resulta esencial para proteger su biodiversidad (Aguirre-Calderón, 2015). La biodiversidad abarca toda la diversidad natural, es clave para conservar el equilibrio ecológico y garantizar la provisión de servicios ambientales esenciales para la vida, de los cuales las personas obtienen múltiples beneficios (Núñez *et al.*, 2003).

La estructura de las especies representa un indicador de la biodiversidad, y el análisis de la composición florística resulta esencial para su manejo, ya que permite valorar el estado actual de las comunidades vegetales, a su vez, da un indicio del estado actual de cada especie, lo que ayuda a poder desarrollar mejores acciones de conservación o mejora (Graciano-Ávila *et al.*, 2017; Peralta-Kulik *et al.*, 2018).

Con base en este contexto, se utilizan indicadores que reflejan la relevancia ecológica de las especies, entre los cuales sobresale el índice de valor importancia (IVI), el cual se obtiene de la suma relativa de abundancia, frecuencia y dominancia, la obtención de esta información es fundamental en este proceso de evaluación (Alvis, 2009; Soler *et al.*, 2012), a su vez, se emplean el índice de Margalef y el índice de Shannon, estos índices son herramientas que aportan información a la hora de tomar decisiones en el manejo de ecosistemas forestales, son indicadores que se pueden utilizar en diferentes entornos con diversas condiciones (Hernández-Salas *et al.*, 2013; López-Hernández *et al.*, 2017).

Aunque existen estudios sobre la regeneración de comunidades vegetales en bosques de coníferas (Flores-Garnica *et al.*, 2020; Godínez *et al.*, 2016; Martínez-Garza *et al.*, 2022; Ramos-Reyes *et al.*, 2017), la información disponible sobre la recuperación de este tipo de ecosistemas afectado por actividades agrícolas y/o ganaderas en el Norte de México es limitada. En este contexto, los objetivos de la presente investigación fueron 1) analizar la composición y la diversidad de especies arbóreas en un bosque árido templado del Noreste de México con antecedentes de uso agrícola y pecuario y 2) determinar el porcentaje de supervivencia de una plantación de *Pinus cembroides* (Zucc.), con una antigüedad de diez años.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudios

El estudio se llevó a cabo en el ejido la Tapona, situado en el municipio de Galeana, Nuevo León (Figura 25), dentro de la Sierra Madre Oriental, específicamente en la Subprovincia de la Gran Sierra Plegada. Su ubicación geográfica corresponde a las coordenadas geográficas $24^{\circ}42'31,7''N$ y $100^{\circ}06'13,25''O$, con una altitud que varía entre 1931 y 1958 m. La región presenta un clima templado seco [BSok(x')], con temperaturas anuales que oscilan entre los 12° y 18° y niveles de precipitación entre 400 y 600 mm (García, 2004, INEGI, 1989, 2021). El tipo de suelo dominante es Leptosol con presencia de Xerosol cálcicos con una vegetación característica correspondiente principalmente a bosque de coníferas (INEGI, 2014).

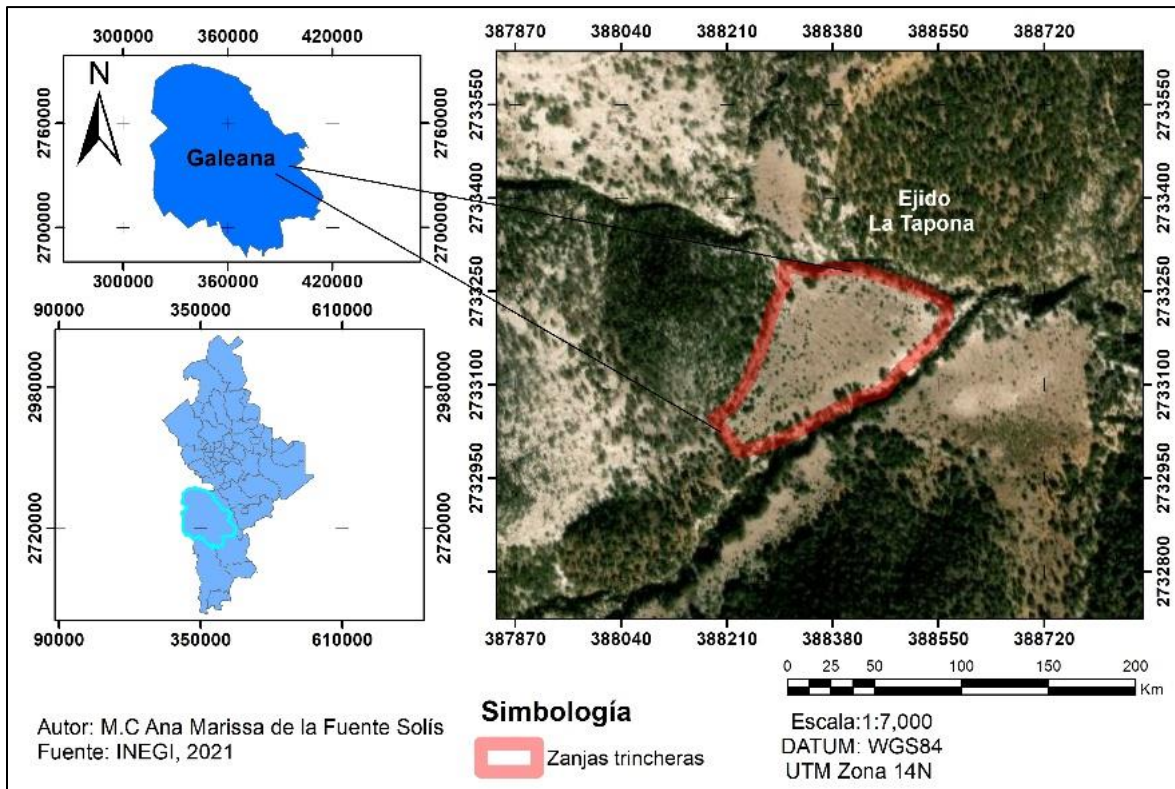


Figura 21. Ubicación del área de estudio.

2.2 Obras de conservación (Zanjas trincheras y terrazas individuales).

Las zanjas trincheras y terrazas individuales, son obras que se implementan en la reforestación (Figura 26). Las zanjas trincheras son un conjunto de excavaciones intercaladas y diseñadas en

cuervas a nivel. En el área de estudio presentaron dimensiones de 0.5 m de ancho, 0.4 m de profundidad y aproximadamente 2.2 m de longitud, con una distancia entre zanja y zanja de alrededor de 2 m (Cotler *et al.*, 2015). El objetivo de estas obras es acortar la trayectoria del escurrimiento superficial, captar el agua y disminuir los procesos de erosión (CONAFOR, 2023).



Figura 22. Zanjas trincheras y terrazas individuales en el ejido La Tapona.

Por otro lado, las terrazas individuales son obras circulares, tienen como mínimo 1 metro de diámetro y 10 centímetros de profundidad de corte, cada uno con un árbol forestal plantado en su centro. Su principal objetivo es retener el agua de los escurrimientos superficiales y con ello aumentar la humedad en los suelos disponible para las plántulas. Además, se utilizan con el propósito de reducir la erosión, incrementar la supervivencia y crecimiento de los árboles (CONAFOR, 2023).

2.3 Análisis de la regeneración natural

Para analizar la regeneración natural del área reforestada, se delimitaron 14 parcelas de 1000 m² cada una (Figura 27), distribuidas de forma aleatoria. El número de sitios se determinó con base en la intensidad de muestreo, considerando un 25 %, porcentaje considerado adecuado y representativo para la evaluación de comunidades vegetales (Arteaga-Martínez, 2001; Alanís-Rodríguez *et al.*, 2020). En cada parcela se registraron todos los individuos leñosos y suculentas, identificando la especie y midiendo su altura total y el diámetro de copa.

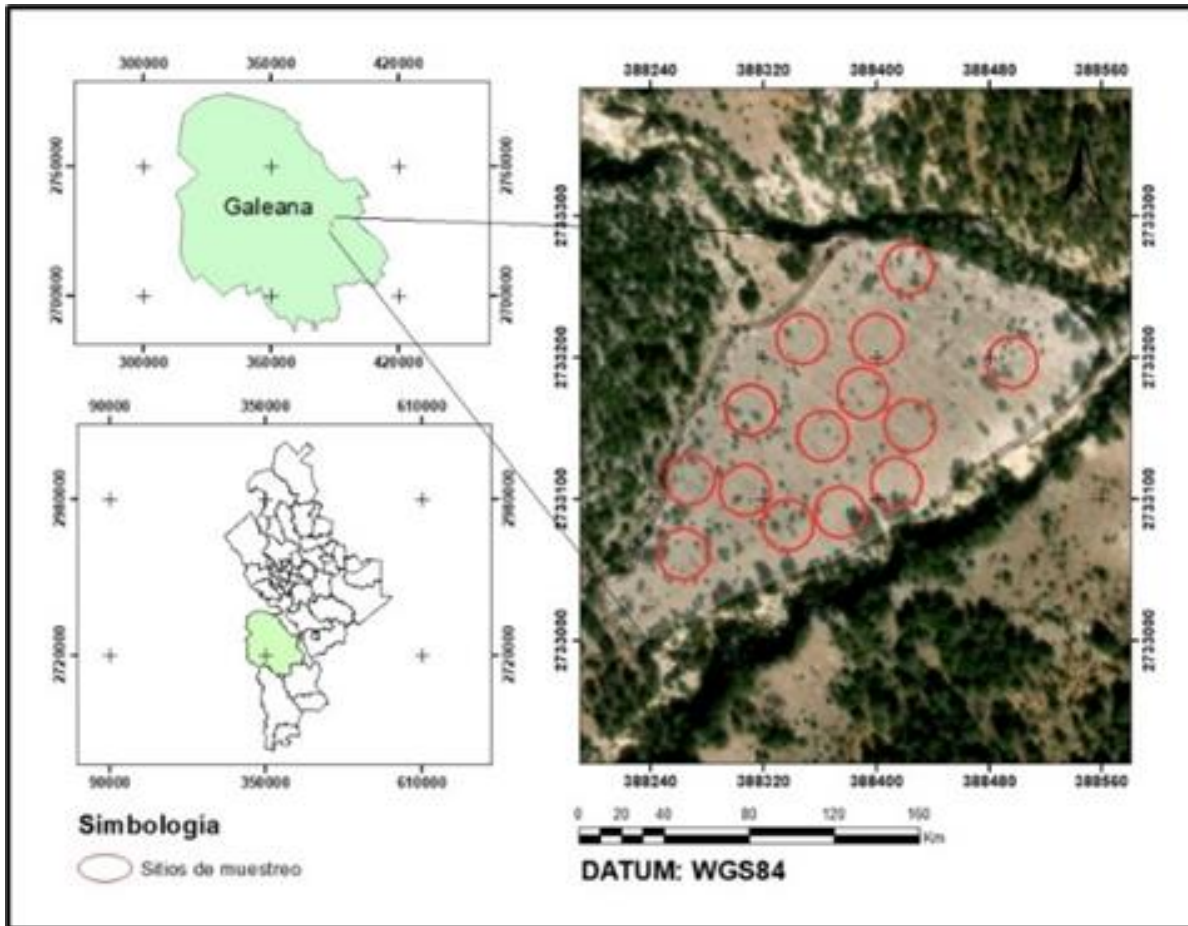


Figura 23. Localización de los 14 sitios de muestreo de 1000 m².

Se evaluó el porcentaje de supervivencia de la plantación de *Pinus cembroides*, se utilizó la siguiente ecuación para calcularla (Mata-Balderas *et al.*, 2022; SEMARNAT, 2010):

$$\%S = \left(\frac{pi}{p(N)} \right) * 100$$

Donde: %S = Porcentaje de supervivencia, *pi* = Número de plantas vivas, *p(N)* = Número de plantas vivas y muertas.

Para cumplir con los objetivos, se estimó la abundancia (*ARi*), dominancia (*DRi*), frecuencia (*FRi*) e IVI (Kuchler *et al.*, 1976).

La abundancia se refiere al número de individuos de una especie por unidad de área en comparación con el total de individuos presentes; es decir, señala cuántas veces fue registrada cada especie (Lamprecht, 1990).

La abundancia absoluta se evaluó mediante:

$$A_i = N_i/S$$
$$AR_i = \left(\frac{A_i}{\sum A_i}\right) * 100$$
$$i = 1 \dots n$$

Donde: A_i = Abundancia absoluta, AR_i = Abundancia relativa de la especie i respecto a la abundancia total, N_i = Número de individuos de la especie i , S = Superficie de muestreo (ha).

La frecuencia hace alusión a la proporción de parcelas de muestreo en las que se encuentra una especie determinada, lo que permite conocer su distribución espacial (Araujo *et al.*, 2008).

La frecuencia relativa se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$F_i = P_i/NS$$
$$FR_i = (F_i/\sum F_i) * 100$$
$$i = 1 \dots n$$

Donde: F_i = Frecuencia absoluta, FR_i = Frecuencia relativa de la especie i respecto a la frecuencia total, P_i = Número de sitios en la que está presente la especie i , NS = Número total de sitios de muestreo.

La dominancia se refiere al nivel de cobertura que presentan las especies como indicador del espacio que ocupan, y se expresa en función del área de copa (Matteucci, 1982). La dominancia relativa es determina como el porcentaje que representa el área de copa de cada especie en relación con el área total de copa de todos los individuos, así mismo, la dominancia absoluta se obtiene sumando las áreas de copa de todos los ejemplares pertenecientes a una misma especie (Lamprecht, 1990).

La dominancia relativa fue estimada utilizando la siguiente fórmula:

$$D_i = \frac{A_b}{S}$$
$$DR_i = \left(\frac{D_i}{\sum D_i}\right) * 100$$
$$i = 1 \dots n$$

Donde: D_i = Dominancia absoluta, DR_i = Dominancia relativa de la especie i respecto a la dominancia total, A_b = Área basal de la especie i , S = Superficie (ha).

Con dicha información se calculó el IVI, el cual expresa en porcentajes dentro de una escala del 0 al 100 (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2020; Marroquín-Castillo *et al.*, 2016). El IVI se obtiene mediante la suma de los valores relativos de abundancia, frecuencia y dominancia correspondiente a cada especie. El valor resultante representa la relevancia ecológica o el peso relativo de cada especie dentro de la comunidad vegetal (Araujo *et al.*, 2008; Finol-Urdaneta, 1971). Se evaluó mediante (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2020; Whittaker, 1972).

$$IVI = \frac{AR_i + DR_i + FR_i}{3}$$

Donde: IVI = Índice de valor de importancia, AR_i = Abundancia relativa de la especie i , DR_i = Dominancia relativa de la especie i , FR_i = Frecuencia relativa de la especie i .

Para estimar la riqueza de especies se utilizó el índice de Margalef (D_{Mg}) (Clifford & Stephenson, 1975; Margalef, 1958).

$$D_{Mg} = \frac{(S - 1)}{\ln(N)}$$

Donde: S = Número de especies presentes, \ln = Logaritmo natural, N = Número total de individuos.

Para estimar la diversidad alfa, se emplearon el índice de Shannon & Weiner (H') (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2015; Shannon & Weaver 1948) y el índice de Diversidad Verdadera de Shannon (1D), utilizando las siguientes ecuaciones (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2020).

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i * \ln(p_i)$$

$$p_i = n_i/N$$

Donde: p_i = Abundancia proporcional de la i -ésima especie.

$${}^1D = \exp(H')$$

Donde: 1D = Índice de diversidad verdadera de Shannon, H' = Índice de Shannon-Weiner.

2.4 Supervivencia y crecimiento del *Pinus cembroides* Zucc.

Se siguió un diseño de muestreo sistemático aleatorio, en el que se seleccionaron 13 curvas de nivel de cada tratamiento (zanjas trincheras y terrazas individuales) con una intensidad de muestreo de 21 %. En cada curva de nivel seleccionada se delimitó un transecto (unidad de muestreo) de 50 m, debido a que no todas tenían la misma longitud (Figura 28) (Prieto & Goche, 2018).

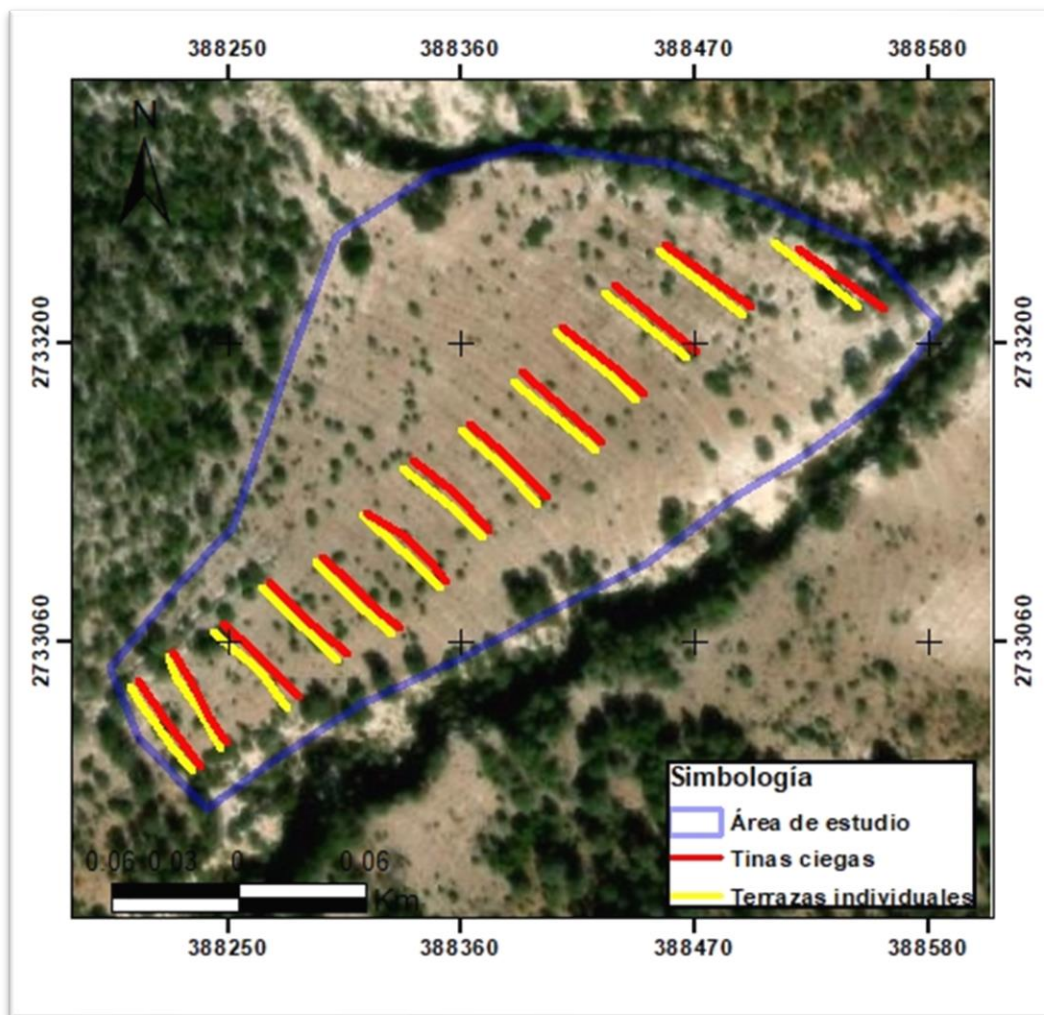


Figura 24. Transectos de 50 m. para la determinación de la supervivencia y crecimiento del *Pinus cembroides*.

En cada transecto de 50 m se consideraron todos los individuos de *P. cembroides*. En el caso de zanjas trincheras fueron 12 por transecto y en las terrazas individuales 25. A cada individuo se le midió la altura total (m), el diámetro de copa (m) y el diámetro basal a los 10 cm por encima del nivel del suelo. Estas mediciones se hicieron con un flexómetro Truper® modelo FA-3M de 3 m

para la altura total; el diámetro de copa se midió en dos direcciones (norte-sur y este-oeste) con una cinta métrica Stanley® modelo 30-088, y el diámetro basal se registró con un vernier digital Steren® modelo HER-411 de 15 cm (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2020).

Para evaluar la supervivencia de la plantación de *Pinus cembroides*, se contabilizaron las plantas vivas y muertas (%). Posteriormente, se aplicó la siguiente ecuación para calcularla (Mata-Balderas *et al.*, 2022; SEMARNAT 2010).

$$\%S = \left(\frac{pi}{p(N)} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde:

$\%S$ = Porcentaje de supervivencia, pi = Número de plantas vivas, $p(N)$ = Número de plantas vivas y muertas.

Con base en las variables de diámetro basal y diámetro de copa, se estimaron a nivel individuo el área basal y área de copa (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2020).

Para comparar los valores obtenidos entre las terrazas individuales y las zanjas trincheras, se aplicó la prueba de t de Student para muestras independientes. Previamente al análisis, se evaluó la normalidad de los datos mediante la prueba de Kolmogorov- Smirnov con la corrección Lilliefors, con el fin de determinar si los datos seguían una distribución normal. Además, se realizó la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney para determinar si existían diferencias significativas entre la altura total, el área basal y el área de copa entre los dos tratamientos, terrazas individuales y las zanjas trincheras, ya que estos valores no cumplían los supuestos requeridos para la aplicación de la prueba de t . Para la obtención de los análisis se utilizó el programa estadístico Statistical Package for Social Sciences (SPSS), Inc. de Chicago, Illinois.

3. Resultados

3.1 Análisis de la regeneración natural

Se identificaron un total de 19 especies, distribuidas en 16 géneros y 13 familias (Tabla 1). Los géneros que contaron con dos especies cada uno fueron *Cercocarpus*, *Juniperus* y *Opuntia*. La familia con mayor cantidad de ejemplares Pinaceae con una densidad de 476 individuos ha⁻¹, seguida de la Fabaceae con 266 individuos ha⁻¹ distribuidos en tres especies y tres géneros.

Tabla 1. Especies encontradas en la plantación en el ejido La Tapona (ordenadas alfabéticamente).

Nombre científico	Nombre común	Familia
<i>Agave scabra</i> Salm-Dyck	Maguey	Asparagaceae
<i>Atriplex</i> sp	Atriplex	Amaranthaceae
<i>Berberis trifoliolata</i> Moric.	Agrito	Berberidaceae
<i>Brickellia veronicifolia</i> (Kunth)A. Gray	Brickellia	Asteraceae
<i>Buddleja scordioides</i> Kunth	Escobilla, salvilla	Escrofulariaceas
<i>Cercocarpus fothergilloides</i> Kunth	Ramón	Rosaceae
<i>Cercocarpus macrophyllus</i> C.K.Schneid.	Limoncillo	Rosaceae
<i>Condalia ericoides</i> (A. Grey) M.C Johnston	Abrojo	Rhamnaceae
<i>Croton suaveolens</i> Torr.	Encinillo	Euphorbiaceae
<i>Dalea greggii</i> A. Grey	Orégano Cimarrón	Fabaceae
<i>Gymnosperma glutinosum</i> (Spreng.) Less.	Tatalencho	Asteraceae
<i>Juniperus monosperma</i> (Engelm.) Sarg.	Junípero de una semilla, sabino	Cupressaceae
<i>Juniperus saltillensis</i> M. T. Hall	Juniperus saltillensis	Cupressaceae
<i>Mimosa texana</i> A. Gray	Uña de gato	Fabaceae
<i>Opuntia imbricate</i> (Haworth) DC	Cardache, entraña, cardón	Cactaceae
<i>Opuntia phaeacantha</i> Engelm.	Nopal	Cactaceae
<i>Pinus cembroides</i> Zucc.	Pino Piñonero	Pinaceae
<i>Rhus pachyrrhachis</i> Hemsl.	Rhus	Anacardiaceae
<i>Vachellia constricta</i> , Benth	Chaparro prieto	Fabaceae

En cuanto a la abundancia por familia, Pinaceae fue la más numerosa con 476 individuos ha⁻¹, seguido por Fabaceae con 266 individuos ha⁻¹ y Euphorbiaceae con 161 individuos ha⁻¹. Por el contrario, las familias con menor representación fueron Asparagaceae (3 individuos ha⁻¹),

Amaranthaceae (2 individuos ha^{-1}); Anacardiaceae, Berberidaceae y Rosaceae cada una con solo individuo por hectárea. De las 19 especies registradas, cinco (*Pinus cembroides*, *Croton suaveolens*, *Mimosa texana*, *Dalea greggii* y *Brickellia veronicifolia*) (Figura 29) concentraron el 77.21% de la abundancia, destacando el *Pinus cembroides*, que por sí sola represento el 36.81% (Tabla 2). La tasa de supervivencia registrada, con base en la densidad de plantación, fue del 47.6%.

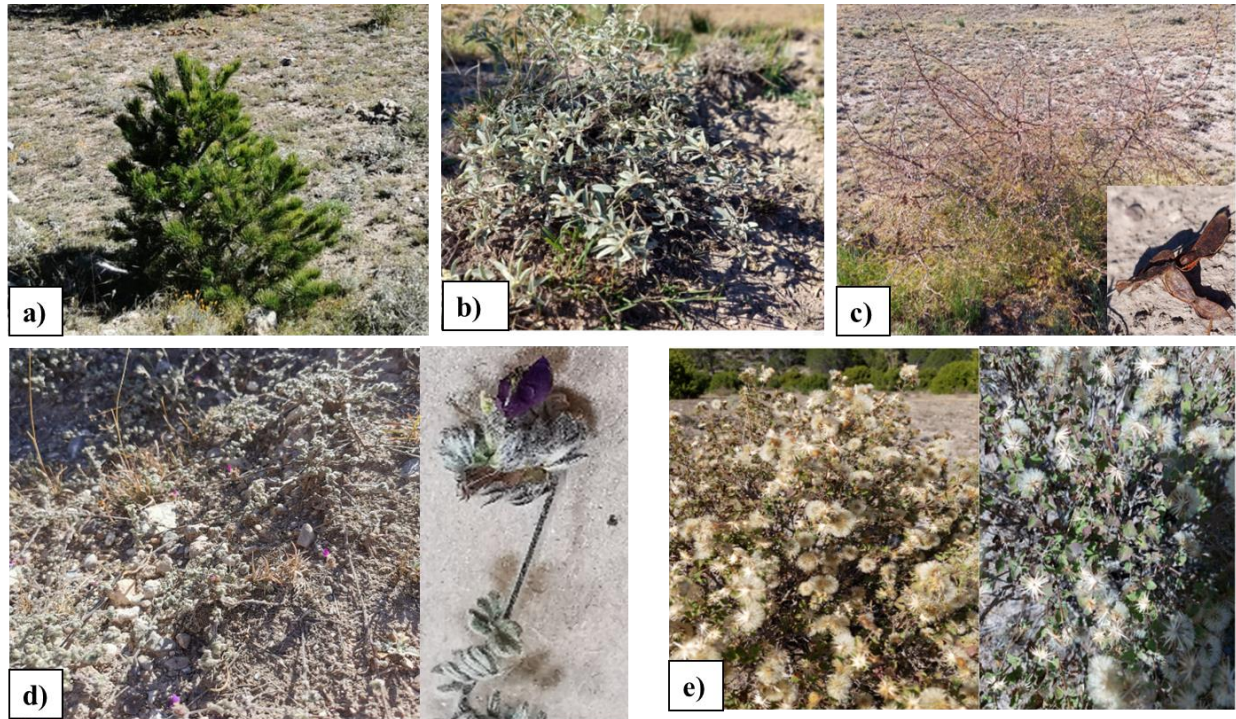


Figura 25. Especies más abundantes en el presente estudio. a) *Pinus cembroides*, b) *Croton suaveolens*, c) *Mimosa texana*, d) *Dalea greggii* y e) *Brickellia veronicifolia*

En términos de dominancia, la vegetación de la comunidad presentó una cobertura de $849.03 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, lo que equivale a un 8.49 % del área total. Si se excluye al *Pinus cembroides*, la cobertura vegetal de $703.74 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, equivalente al 7.03 %. La especie con mayor valor de cobertura fue *Juniperus monosperma* con un 53.37 %. Considerando las tres especies (*Juniperus monosperma* (Figura 30), *Pinus cembroides* y *Mimosa texana*) estas representan en conjunto el 84.90 % del total

de la cobertura vegetal. Respecto a la frecuencia, únicamente *Juniperus monosperma* y *Pinus cembroides* estuvieron presentes en todos los sitios muestreados (Tabla 2).



Figura 26. *Juniperus monosperma* (Engelm.) Sarg.), especie con el valor mayor de IVI.

Tabla 2. Especies ordenaron de manera descendente de acuerdo a su valor de IVI.

Especies	Abundancia (N/ha)		Dominancia (m ² /ha)		Frecuencia		IVI
	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	
<i>Juniperus monosperma</i>	67	5.19	453.13	53.37	100.00	12.73	23.76
<i>Pinus cembroides</i>	476	36.81	145.29	17.11	100.00	12.73	22.22
<i>Mimosa texana</i>	140	10.82	122.38	14.41	92.86	11.82	12.35
<i>Croton suaveolens</i>	161	12.47	11.69	1.38	64.29	8.18	7.34
<i>Brickellia veronicifolia</i>	96	7.45	19.63	2.31	85.71	10.91	6.89
<i>Juniperus saltillensis</i>	28	2.15	15.59	1.84	78.57	10.00	4.66
<i>Dalea greggii</i>	125	9.66	5.64	0.66	21.43	2.73	4.35
<i>Condalia ericoides</i>	34	2.59	33.26	3.92	50.00	6.36	4.29
<i>Opuntia phaeacantha</i>	50	3.86	8.29	0.98	57.14	7.27	4.04
<i>Buddleja scordioides</i>	64	4.97	4.13	0.49	21.43	2.73	2.73
<i>Gymnosperma glutinosum</i>	33	2.54	17.61	2.07	21.43	2.73	2.45
<i>Opuntia imbricata</i>	10	0.77	4.67	0.55	35.71	4.55	1.96
<i>Atriplex</i> sp	2	0.17	1.51	0.18	14.29	1.82	0.72
<i>Cercocarpus macrophyllus</i>	1	0.06	2.85	0.34	7.14	0.91	0.43
<i>Cercocarpus fothergilloides</i>	1	0.11	1.34	0.16	7.14	0.91	0.39

<i>Agave scabra</i>	3	0.22	0.15	0.02	7.14	0.91	0.38
<i>Vachellia constricta</i>	1	0.06	0.90	0.11	7.14	0.91	0.36
<i>Rhus pachyrrhachis</i>	1	0.06	0.61	0.07	7.14	0.91	0.35
<i>Berberis trifoliolata</i>	1	0.06	0.36	0.04	7.14	0.91	0.34
Total	1294	100	849.03	100	785.71	100	100

Las especies con mayor importancia ecológica, de acuerdo al IVI, fueron *Juniperus monosperma* (23.76%), *Pinus cembroides* (22.22%) y *Mimosa texana* (12.35%). En contraste, las especies *Atriplex sp*, *Cercocarpus macrophyllus*, *Cercocarpus fothergilloides*, *Agave scabra*, *Vachellia constricta*, *Rhus pachyrrhachis* y *Berberis trifoliolata* mostraron un IVI menor a 1 (Figura 31 y Gráfica 1).

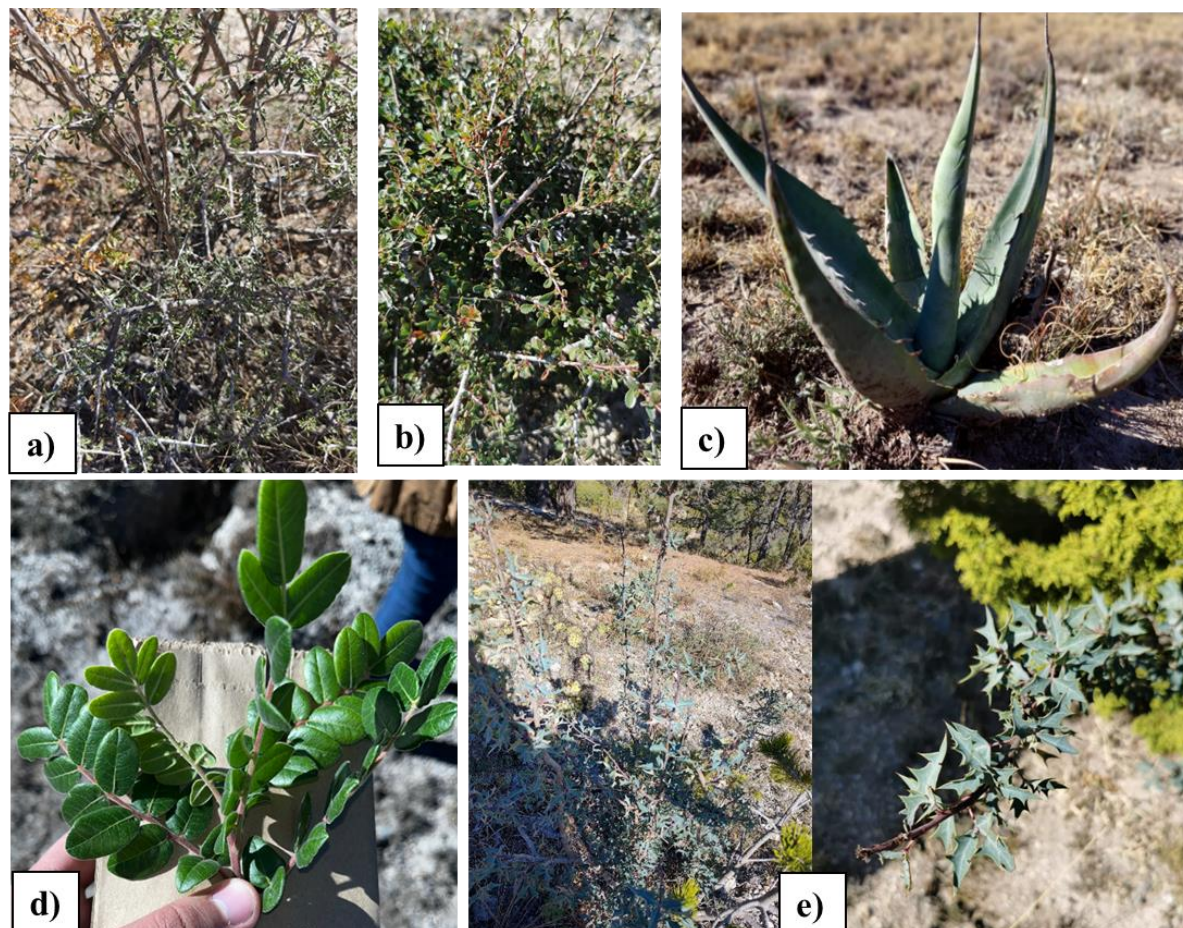
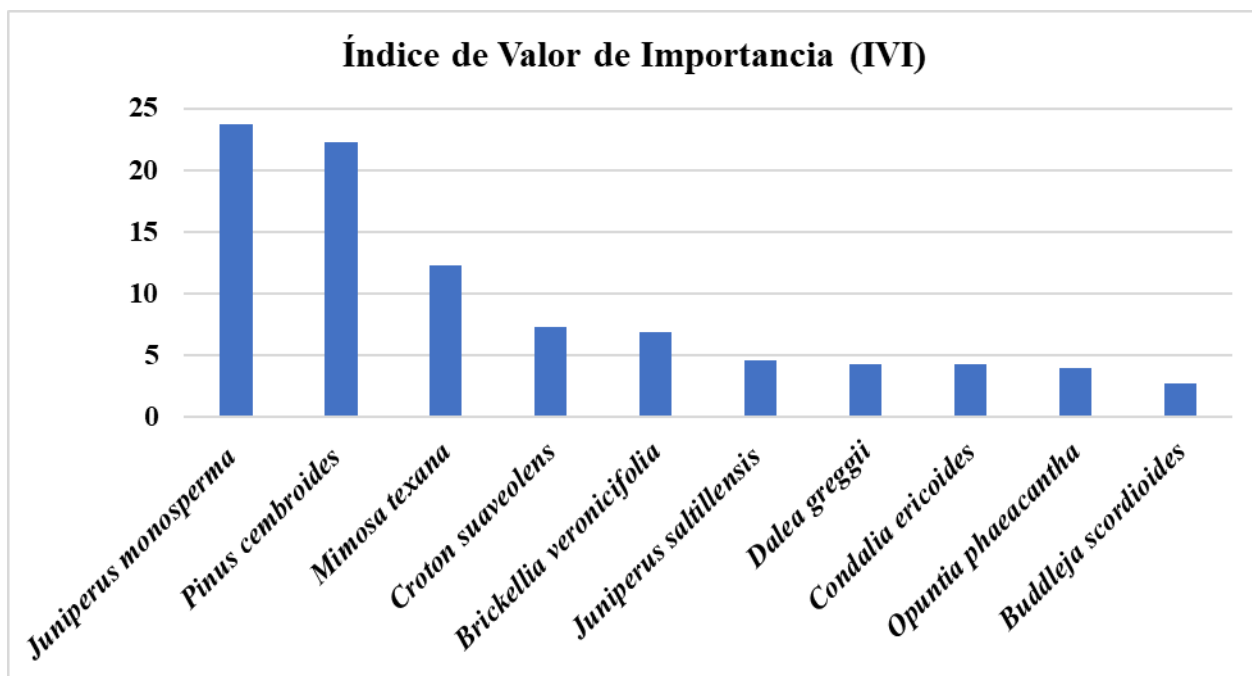


Figura 27. Especies con menor valor de IVI. a) *Atriplex sp*, b) *Cercocarpus fothergilloides*, c) *Agave scabra*, d) *Rhus pachyrrhachis* y e) *Berberis trifoliolata*.



Gráfica 1. Especies con mayor IVI.

3.1.2 Diversidad

La comunidad vegetal analizada presentó un índice de Margalef de 2.51. En a la diversidad específica, el índice de Shannon fue de 2.07, mientras que el índice de Diversidad Verdadera de Shannon (1D) alcanzó un valor de 7.94. Los resultados indican una riqueza específica compuesta por 19 especies.

3.2 Supervivencia y crecimiento del *Pinus cembroides* Zucc.

La Tabla 3 muestra los valores promedios correspondientes a la altura, el diámetro a los 10 cm y la cobertura, incluyendo sus medias y desviaciones estándar para cada tratamiento aplicado.

Tabla 3. Valores promedio y desviación estándar en los diferentes tratamientos, Zanjas trincheras (ZT) y Terrazas individuales (TI).

<i>Pinus cembroides</i>	Media y desviación estándar	
	ZT	TI
Altura (m)	0.569±0.260	0.622±0.329
Diámetro basal (d _{0.10 m})	1.96±0.886	2.01±1.00

Cobertura (m)

0.489±0.201

0.513±0.239

El análisis mediante la prueba de t indicó que no existen diferencias estadísticamente significativas en la tasa de supervivencia ($p = 0.471$) de *Pinus cembroides* al comparar zonas de tratamiento TI y ZT. Asimismo, la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney evidenció que no se observaron diferencias en las variables de altura, área de copa y área basal entre los tratamientos comparados (Tabla 4).

Tabla 4. Prueba de Mann-Whitney en altura, área de copa y área basal en los diferentes tratamientos, Zanjas trincheras y Terrazas individuales.

<i>Pinus cembroides</i>	Altura	Área de copa	Área basal
U de Mann-Whitney	11658.000	12003.500	12348.000
Z	-0.918	-0.491	0.064
Sig. asintót. (bilateral)	0.358	0.624	0.949

La tasa promedio de supervivencia a los 10 años de la plantación de *Pinus cembroides* fue del 52.69%. En detalle, las plantaciones con tratamiento de ZT presentaron un 53.71%, mientras que aquellas bajo tratamiento con TI obtuvieron un 51.68%.

4. Discusión

4.1 Análisis de la regeneración natural

4.1.1 Composición arbórea

La familia mejor representada en términos de número de individuos fue la Pinaceae, seguida por Fabaceae. Esta última registró una densidad de 266 individuos ha^{-1} distribuidas en tres especies, cifra considerada inferior a la reportada por Ramos-Castillo, (2022) en el estado de Chihuahua, donde se documentaron 21 especies, esta diferencia puede atribuirse a las condiciones ecológicas contrastantes entre ambas zonas; mientras que el área referida por Ramos-Castillo se encuentra en una región templada subhúmeda con bosques mixtos, el sitio analizado en este estudio se localiza en una zona de clima templado seco o árido. Asimismo, la distribución de las familias está estrechamente relacionada con los factores climáticos; por ejemplo, la Fabaceae presenta una notable representación en forma de arbustos en regiones de clima templado (Estrada-Castillón *et al.*, 2004).

4.1.2 Abundancia

El análisis de los datos reveló que cuatro especies exhibieron una abundancia relativa considerablemente superior respecto a las demás: *Pinus cembroides* (36.81%) con 476 individuos, *Croton suaveolens* (12.47 %) con 161 individuos, *Mimosa texana* (10.82%) con 140 individuos y *Dalea reggii* (9.66 %) con 125 individuos. La presencia de *Pinus cembroides* puede explicarse por actividades de reforestación previas. En función de la densidad de plantación, se estimó una tasa de supervivencia del 46.6%. Investigaciones previas (López-Hernández *et al.*, 2017 y Aguirre-Calderón *et al.*, 2022) también han registrado que el género *Pinus* tiende a dominar en bosques templados bajo esquemas de manejo forestal. Por otra parte, el género *Croton* ha sido documentado en áreas con perturbaciones y más común en laderas inferiores (Eilu & Obua, 2005). El género *Mimosa* prospera en sitios alterados, como los que han sido impactados por el pastoreo, condición que caracteriza el área de estudio. Además, estas especies tienen la capacidad de crear “islas de recursos”, facilitando el establecimiento de otras especies como las cactáceas (Camargo-Ricalde *et al.*, 2010; Orozco-Almanza *et al.*, 2003; Pavón *et al.*, 2011).

4.1.3 Dominancia

El área evaluada presentó un área de copa total de $849.03 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, lo que indica una cobertura de copa del 8.49 %. La mayor cobertura de copa corresponde al *Juniperus monosperma* ($453.13 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), las otras especies son poco frondosas. Esta limitada cobertura puede explicarse por la baja capacidad de resiliencia de los ecosistemas áridos, los cuales están condicionados por una precipitación reducida (Marcus *et al.*, 2011). Asimismo, algunas especies enfrentaron un riesgo elevado de mortalidad debido a factores como la erosión y la sequía, lo que favorece el desarrollo de especies como *Juniperus*, adaptadas a entornos con escasa disponibilidad hídrica (Castro-López, 2020; Martens *et al.*, 2001). Su espeso follaje le favorece para almacenar agua mejor que otras especies identificadas en el sitio (Castro-López, 2020; Lecona-Urrutia, 2000).

La especie que más resaltó fue *Juniperus monosperma* con 67 individuos que cubren $453.13 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ con dominancia relativa de 53.37%, seguido del *Pinus cembroides* con 17.11%. Estos resultados contrastan con los reportados por Graciano-Ávila *et al.*, 2017 quienes documentaron una dominancia relativa del género *Pinus* de 70.98% y solo 3.15% para el género *Juniperus* en un bosque templado maduro. Castro-López, (2020) destaca que las especies de juníperos en México poseen conos carnosos y dulces, lo cual favorece su dispersión por aves y pequeños mamíferos, confiriéndoles una ventaja evolutiva. Velazco-Macías *et al.*, (2011) señalan que el norte de México ofrece condiciones ambientales propicias para el crecimiento del *J. monosperma* y *J. flaccida*, especies que se adaptan bien a ambientes semiáridos con suelos superficiales y bajos niveles de humedad.

4.1.4 Frecuencia

Las especies *Juniperus monosperma* y *Pinus cembroides* estuvieron presentes en la totalidad de los sitios de muestreo, mostrando una frecuencia absoluta del 100%. En cuanto a la frecuencia relativa, destacan *Juniperus monosperma* y *Pinus cembroides* con 12.73%, *Mimosa texana* con 11.82%, *Brickellia veronicifolia* con 10.91% y *Juniperus saltillensis* con 10.00 %. Diversas especies características de ambientes xéricos, como *Juniperus spp.*, *Agave spp.*, *Berberis trifoliolata*, *Rhus spp.* y *Mimosa biuncifera*, están asociadas a bosques dominados por *Pinus cembroides* (González-Elizondo *et al.*, 1993; Marroquín, 1976). Además, ciertas especies de

Juniperus se desarrollan comúnmente en el noreste de México, en coexistencia con poblaciones de *Quercus* y *Pinus* (Estrada-Castillón *et al.*, 2014).

4.1.5 Índice de Valor de Importancia

Las tres especies con mayor IVI son *Juniperus monosperma*, *Pinus cembroides* y *Mimosa texana* y aportan el 58.33 % del IVI total. Estos resultados reflejan tanto la regeneración natural de *J. monosperma* y *M. texana*, como la reforestación realizada con *P. cembroides*. Estos hallazgos contrastan con los reportados por Valenzuela-Núñez & Granados (2009) en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, donde *P. cembroides* obtuvo un IVI superior al 50%. Asimismo, López-Hernández *et al.*, (2017) obtuvieron del género *Pinus* 85.5 % y el menor IVI fue *Juniperus* 0.54 % en un bosque templado de Puebla.

El género *Juniperus* se caracteriza por su capacidad para crecer en una amplia gama de condiciones edáficas, desde suelos profundos hasta someros, y en climas templados a fríos (Castro-López, 2020; Rodríguez-Trejo, 2021). En escenarios de sequía, donde la humedad del suelo no alcanza capas profundas, las especies del género *Pinus* presentan una mayor vulnerabilidad a la mortalidad en comparación con *Juniperus*, el cual posee un follaje escamoso que le confiere una mayor eficiencia en la retención de agua (Marcus *et al.*, 2011; Martens *et al.*, 2001). Además, se ha documentado que la presencia de *Juniperus* se asocia frecuentemente con bosques de coníferas que han sido afectados por la actividad humana (Estrada-Castillón *et al.*, 2014; Wells, 1965). En contraste, *Pinus cembroides* tiende a prosperar en altitudes elevadas, particularmente por encima de los 2850–2880 m s.n.m., donde las condiciones climáticas son más templadas y las precipitaciones más abundantes (Romero-Manzanares *et al.*, 2012). La altitud del área evaluada en este estudio (1950 m s.n.m.) representa un entorno menos favorable para el desarrollo de esta especie, lo cual podría explicar el crecimiento limitado observado en los individuos plantados.

Adicionalmente, debe considerarse que la zona de estudio correspondía anteriormente a terrenos agrícolas, lo que ha provocado alteraciones en las propiedades del suelo, incluyendo su degradación. El género *Mimosa*, por su parte, se adapta bien a condiciones de aridez prolongada y es común en regiones áridas y semiáridas (Orozco-Almanza *et al.*, 2003), lo que explica su alta contribución al IVI en esta área.

4.1.6 Riqueza específica

De acuerdo con Margalef (1972), este índice varía entre 1 y 5, clasificándose valores inferiores a dos como diversidad baja y valores superiores a cinco son considerados como indicativos de alta diversidad. En este estudio, el valor del índice de Margalef ($DMg = 2.51$) indica una diversidad de nivel medio. Asimismo, el índice de Shannon obtenido ($H' = 2.07$) corrobora esta clasificación intermedia. Estudios comparativos realizados por González-Delgado *et al.* (2017) reportaron valores de DMg entre 1.8 y 5.85, y de H' entre 1.16 y 2.67, en diversos ecosistemas, mientras que Canizales-Velázquez *et al.* (2009) documentaron valores más elevados ($DMg = 6.34$ y $H' = 3.00$) en la Sierra Madre Oriental. En el noreste de México, Mora-Donjuán *et al.* (2014) registraron valores de $DMg = 2.29$ y $H' = 1.87$. En bosques templados, López-Hernández *et al.* (2017) reportaron valores menores, con $DMg = 1.35$ y $H' = 1.37$. Del mismo modo, Navar-Chaidez & González-Elizondo (2009) informaron valores aún más bajos ($DMg = 0.53$ y $H' = 1.33$), lo cual sugiere que el área de estudio presenta mayor diversidad de especies arbóreas en comparación a ecosistemas similares. Esta diversidad intermedia se explica por la distribución relativamente uniforme de la abundancia, dado que dos tercios de las especies registradas superan los 10 individuos, lo que denota una comunidad con menor dominancia y mayor equidad específica.

4.2 Supervivencia y crecimiento del *Pinus cembroides* Zucc.

La tasa promedio de supervivencia del *Pinus cembroides* fue del 52.69% en ambos tratamientos, el porcentaje de supervivencia en zanjas trincheras fue de 53.71%, mientras que en las terrazas individuales se obtuvo el 51.68%, este valor supera ligeramente el 48.8 % reportado por Ortiz-Rodríguez & Rodríguez-Trejo (2008) en una plantación de *Pinus hartwegii* (Lindl.) a tres años de su establecimiento, donde se atribuyó la buena supervivencia al efecto protector proporcionado por los estratos arbustivos y herbáceos.

Sánchez (2008) evaluó la supervivencia de *Pinus oaxacana* (Mirov.) en dos sitios con diferentes tratamientos (reforestación asociada a tina ciega (TC), reforestación con remoción previa de suelo (RS) y reforestación con cepa común (CC)). Las tasas de supervivencia de TC, RS y CC en el sitio 1 fueron del 20%, 29% y 30%, respectivamente. Para el sitio 2, el tratamiento RS alcanzó un 50% y las TC en el bordo fueron del 20%. Para el sitio 1, la reforestación no se consideró exitosa ya

que los valores fueron menores a 50%. Por lo tanto, los valores alcanzados en este estudio para las TC (53.29%) pueden considerarse exitosos.

Por otro lado, Vázquez-García *et al.*, (2016) evaluaron la supervivencia y mortandad en plantaciones forestales en la Mixteca Alta Oaxaqueña. En dicho estudio, se resalta la supervivencia registrada a los 8 y 10 años en la plantación, con porcentajes de supervivencia del 72.35% y 79.52%, respectivamente. Asimismo, se observaron valores de mortandad del 27.59% y 19.52% para esos mismos periodos. La baja tasa de mortalidad y la elevada supervivencia fueron atribuidos a la adecuada selección de especies y a las condiciones climáticas favorables, caracterizadas por una precipitación adecuada de 700-1000 mm, cifra superior a la registrada en la presente investigación.

Respecto a la altura y el área basal, Ventura-Ríos *et al.*, (2017), evaluaron la estructura, la altura, el área basal y biomasa área, seleccionaron 3 áreas reforestadas de 5 (R5), 12 (R12) y 14 (R14) años y un sitio de referencia (SR), en donde encontraron que la condición R5 presentó los valores menores para las 3 características, además, las comparaciones entre R12, R14 y el SR solo mostraron diferencias significativas en la altura y biomasa área.

El éxito de la reforestación depende de múltiples factores como el sistema de producción de plántulas, el tipo de contenedor utilizado y las condiciones del suelo y clima (Escobar-Alonso & Rodríguez-Trejo, 2019). En el área reforestada de este estudio, las plántulas fueron distribuidas en paquetes de 10 en contenedores de hielo seco. Existe evidencia que respalda que el uso de contenedores con mayor volumen mejora significativamente el crecimiento de las plántulas al favorecer el desarrollo radicular y, en consecuencia, su calidad (Prieto-Ruiz *et al.*, 2007).

CONCLUSIONES

Respecto al capítulo 1, los resultados obtenidos evidencian que las zanjas trincheras implementadas en sitios reforestados, han generado mejoras sustanciales en las propiedades físicas, químicas e hídras del suelo. Estos efectos son más evidentes en las zanjas con mayor tiempo de implementación (10 años), donde se observó una mejora integral de las condiciones edáficas en comparación con el testigo.

En relación a las propiedades físicas, los sitios dentro de las zanjas trincheras (LT10d y SL6d) favorecieron una disminución significativa en la DA y la compactación del suelo, así como un notorio aumento en la porosidad total y en la estabilidad de agregados, condiciones que promueven una mejor estructura del suelo y un mayor desarrollo radicular.

En cuanto a las propiedades químicas, dentro de las zanjas trincheras (LT10d y SL6d), estos sitios conservaron y acumularon mayor cantidad de MO y NT, indicando una mayor actividad biológica y un aporte constante de residuos orgánicos, posiblemente por el microambiente protegido dentro de las zanjas y la cobertura vegetal establecida. Aunque el contenido de P fue menor en los sitios con obras, específicamente en SL6d y SL6f, esto puede estar relacionado con su fijación en fracciones de arcilla o condiciones de pH medianamente alcalino. La CE fue baja en todos los tratamientos, sin indicios de salinidad que puedan limitar el desarrollo vegetal.

En lo que respecta a las propiedades hídras, los tratamientos LT10d y LT10f mostraron una mayor capacidad de campo, lo cual se tradujo en una mayor disponibilidad de agua útil para las plantas, en comparación con el testigo y los tratamientos SL6d y SL6f. Este resultado sugiere que las zanjas trincheras, particularmente en suelos con texturas intermedias y mayor antigüedad, promueven condiciones favorables para la retención de humedad. Por su parte, SL6d y SL6f mostraron los valores más altos de PMP, lo que refleja una mayor capacidad de retención, así como también implica una menor fracción de agua útil para las plantas.

En general, estos hallazgos respaldan la hipótesis de que las obras de conservación del suelo reducen su degradación y mejoran sus propiedades físicas, químicas e hídras. Además, reafirman la relevancia de la reforestación y el manejo integral del paisaje como herramienta clave para la restauración y sostenibilidad de los ecosistemas edáficos.

En cuanto al capítulo 2, la comunidad vegetal analizada se compone de 1294 individuos por hectárea, distribuidos en 19 especies, 16 géneros y 13 familias. Se observó un claro predominio de las familias Pinaceae y Fabaceae, mientras que Anacardiaceae y Berberidaceae estuvieron representadas por un número reducido de especies. La cobertura de copa registrada fue baja, lo cual sugiere una limitada capacidad de regeneración natural, evidenciando que el ecosistema aún se encuentra en proceso de recuperación.

Las especies con mayor valor ecológico fueron *J. monosperma* y *M. texana*, las cuales se regeneraron de manera natural, junto con *P. cembroides*, especie introducida mediante acciones de reforestación. Estas tres especies en conjunto representaron el 58.33% del IVI total. Cabe destacar que *J. monosperma* y *M. texana* muestran alta capacidad de adaptación a sitios perturbados y a condiciones ambientales variables. La elevada posición del *Pinus cembroides* se debe a que esta especie fue reforestada en el sitio, sin su establecimiento la cobertura vegetal sería de $703.74 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, lo que corresponde a un 7.03 % del área total. Los valores obtenidos a partir de los índices de diversidad, indican una diversidad específica de tipo intermedia, reflejando cierta heterogeneidad en la estructura florística del sitio.

En cuanto a la plantación de *P. cembroides*, se obtuvo una tasa de supervivencia del 52%, cifra que se sitúa por debajo del umbral mínimo aceptable del 60%, lo cual sugiere áreas de mejora en las estrategias de establecimiento. En términos absolutos, se estimó la presencia de 476 individuos vivos por hectárea.

No se observaron diferencias significativas en la supervivencia y el crecimiento de los individuos de *P. cembroides* plantadas tanto en las áreas de tratamiento zanjas trincheras como terrazas individuales. Y dada la naturaleza poco profunda del suelo tipo leptosol que restringe el desarrollo del suelo y la penetración de las raíces, presenta desafíos, sin embargo, la supervivencia de esta especie se debe a su potencial adaptativo.

El *P. cembroides* es una especie ampliamente utilizada en climas templado seco, áridos y semiáridos, debido a su resistencia a las bajas precipitaciones y su notable adaptabilidad a las condiciones de sequía ya que su sistema de raíces le permite acceder al agua en las profundidades del suelo. Esta falta de disparidad se refleja en la similitud de altura, el diámetro de copa y el diámetro basal. Posiblemente, esta uniformidad se atribuye al hecho de que en las primeras etapas

de desarrollo el *P. cembroides* se adaptó en las obras de conservación de suelo aplicadas en esta zona en particular, beneficiándose de manera similar.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, S. M. (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos.
- Aguirre, L. A. (2014). Determinación del efecto de tres enmiendas orgánicas en un Andosol, Polomolok, South Cotabato, Mindanao, República de Filipinas.
- Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Manejo forestal en el siglo XXI. *Madera Bosques*, 21. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210423>.
- Aguirre-Calderón, O. A., Flores-Morales, E. A., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Alanís-Rodríguez, E., Ángeles-Pérez, G., & Huizar-Amezcuca, F. (2022). Diversidad y estructura arbórea de un bosque templado bajo manejo en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, México. *Polibotánica*, 0(54). DOI: <https://doi.org/10.18387/polibotanica.54.2>.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Mora-Olivo, A., Martínez-Ávalos, J. G., Mata-Balderas, J. M., Chávez-Costa, A. C., & Rubio-Camacho, E. A. (2015). Estructura y diversidad del matorral submontano contiguo al área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México. *Acta botánica mexicana*, no.113., oct., pp. 1- 19, DOI: <https://doi.org/10.21829/abm113.2015.1093>
- Alanís-Rodríguez, E., Mora-Olivo, A., & Marroquín de la Fuente, J. S. (2020). Muestreo Ecológico de la Vegetación, Monterrey, Nuevo León, México, Editorial Universitaria UANL. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/343137042>. [Fecha de acceso: 4 de octubre del 2023].
- Alvis Gordo, J. F. (2009). Análisis estructural de un bosque natural localizado en zona rural del municipio de Popayan. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Grupo de Investigación TULL. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/710>. [Fecha de acceso: 23 de septiembre del 2023].
- Araujo, P., Iturre, M., Acosta, H., & Renolfi, R. (2008). Estructura del bosque de La María EEA INTA Santiago del Estero. Quebracho. *Revista de Ciencias Forestales*, no. 16(0385), pp. 15-19. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48112952001>. [Fecha de acceso: 10 de octubre del 2023].

- Aristizábal Gutiérrez, F. A., & Cerón Rincón, L. E. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista colombiana de biotecnología*, 14(1), 285-295. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77624081026>. [Fecha de acceso: 12 de febrero del 2024].
- Arteaga-Martínez, B. (2001). Evaluación dasométrica de plantaciones de cuatro especies de pinos en Ayotxtla, Guerrero. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 6(2), pp.151–157.
- Avalos, H. C., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta ecológica*, (83), 5-71. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53908302>. [Fecha de acceso: 23 de septiembre del 2023].
- Barrientos, R. (2013). Propuesta de prácticas de conservación de suelos en ambientes semiáridos: caso microcuenca La Joya (Tesis de Maestría), Universidad Autónoma de Querétaro.
- Beltrán, M., J. (2018). Propiedades físicas de los suelos, un recurso natural prestador de servicios biológicos y ambientales. Artículo en Revisión. *Biological Research*. <https://www.researchgate.net/publication/323906391>.
- Blanco-Sepúlveda, R. (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*, 43(3), 231-239. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30211225002>. [Fecha de acceso: 28 de enero del 2024].
- Brady, N. C. & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils*. Pearson Education Limited. England.
- Bremner, J. M. and C. S. Mulvaney. (1982). Nitrogen-total, pp. 595-624. In A. L. Page (ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Agronomy 9. Madison, Wisconsin
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22.
- Camargo-Ricalde, S. L., Montañón, N. M., Reyes-Jaramillo, I., Jiménez-González, C., & Dhillion, S. S. (2010). Effect of mycorrhizae on seedlings of six endemic *Mimosa* L. species

(Leguminosae-Mimosoideae) from the semi-arid Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Trees - Structure and Function*, 24(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0379-z>

Canizales-Velázquez, P., Alanís-Rodríguez, E., Aranda-Ramos, R., Mata-Balderas, J. M., Jiménez-Pérez, J., Alanís-Flores, G., Uvalle-Sauceda, J. I., & Ruiz-Bautista, M. G. (2009). Caracterización estructural del matorral submontano de la sierra madre oriental, Nuevo León, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 15(2), 115–120. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62912351005>. [Fecha de acceso: 25 de octubre del 2023].

Cardoza Vázquez, R., Cuevas Flores, L., García Carreón, J. S., Guerrero Herrera, J. A., González Olarte, J. C., Méndez, H. H., ... & Martínez, V. (2007). Protección, restauración y conservación de suelos forestales: manual de obras y prácticas.

Castro-López, L. A. (2020). Distribución potencial de los géneros *Picea* y *Juniperus* en México durante el último máximo glacial. Iztapalapa, Ciudad de México.

Chaer, G. M., Myrold, D. D., & Bottomley, P. J. (2009). A soil quality index based on the equilibrium between soil organic matter and biochemical properties of undisturbed coniferous forest soils of the Pacific Northwest. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(4), 822-830. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.02.005>.

Chicas Soto, R. A., Vanegas Chacón, E. A., & García Álvarez, N. (2014). Determinación indirecta de la capacidad de retención de humedad en suelos de la subcuenca del río Torjá, Chiquimula, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 23(1), 41–46. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/271>. [Fecha de acceso: 1 de septiembre del 2023].

Clifford, H.; & Stephenson, W. (1975). *An Introduction to Numerical Classification*, Academia Press.

CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. (2023). *Manual de restauración forestal*. Zapopan, Jalisco, México. 3er. Edición, 113 p. www.gob.mx/conafor

Cotler, H., Lara, J. A., Cram, S., Guevara, A., Galván, E. L., Ramírez, A., & Núñez, J. M. (2022). Assessment of unintended effects of ditches on ecosystem services provided by Iztaccihuatl-

Popocatepetl National Park, Mexico. *Acta universitaria*, 32. DOI: <http://doi.org/10.15174/au.2022.3647>.

Cotler, H., S. Cram, S. Martínez Trinidad y V. Bunge. (2015). Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (88), 6-18. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.47378>.

Cremona, M. V., & Enriquez, A. S. (2020). Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica. *EEA Bariloche*.

Eguiarte, D. R. G. (2007). Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 187-194.

Eilu, G., & Obua, J. (2005). Tree condition and natural regeneration in disturbed sites of Bwindi Impenetrable Forest National Park, southwestern Uganda. *Tropical Ecology*, 46(1), 99–111.

Escobar-Alonso, S., & Rodríguez Trejo, D., A. (2019). Estado del arte en la investigación sobre calidad de planta del género *Pinus* en México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(55), 4-38. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.558>.

Estrada-Castillón, E. A., Villarreal Quintanilla, J. A., Salinas Rodríguez, M. M., Cantú Ayala, C. M., González Rodríguez, H., & Jiménez Pérez, J. (2014). Coníferas de Nuevo León, México. www.fcf.uanl.mx.

Estrada-Castillón, E., Yen-Méndez, C., Delgado-Salinas, A., & Villarreal-Quintanilla, J. (2004). Leguminosas del centro del estado de Nuevo León, México. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 75(1). [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40075105>. [Fecha de acceso: 15 de octubre del 2023].

FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. 4ª ed. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [En línea]. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d-142b3a14a049/content>. [Fecha de acceso: 2 de septiembre del 2023].

Fertirriego, E. (2009). El manejo de la conductividad eléctrica. Centro de Investigación en Química Aplicada. (Tesis Doctorado). Centro de Investigación en Química Aplicada. 41 p.

- Finol-Urdaneta, H. (1971). Nuevos parámetros a considerarse en el análisis estructural de las selvas vírgenes tropicales. *Revista Forestal Venezolana (Venezuela)*, v. 14(21), pp. 29-42.
- Flores-Garnica, José. G., Flores Rodríguez, Ana. G., Lomelí Zavala, M. E., Ruiz Guzmán. Eliceo, & García Bernal, J. M. (2020). Evaluación de la respuesta de la regeneración natural en áreas bajo diferentes condiciones de impacto por incendios forestales.: Vol. Núm. 1 INIFAP-CIRPAC (INIFAP). www.inifap.gob.mx.
- Flores-Sánchez, B., Segura-Castruita, M. Á., Fortis-Hernández, M., Martínez-Corral, L., Aldaco-Nuncio, R. A., & Orozco-Vidal, J. A. (2015). Enmiendas de estiércol solarizado en la estabilidad de agregados de un Aridisol cultivado de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(7), 1543-1555. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i7.548>. [Fecha de acceso: 22 de julio del 2024].
- Gallegos, A., Mahecha, J.D., Ramos, S. (Compiladores). (2023). El papel de los suelos en la sostenibilidad del medio ambiente y la sociedad. Vol 4. En: *Hacia un conocimiento global y multidisciplinario del recurso suelo*. Bautista F. y Ayala F. (Eds). Sociedad mexicana de la ciencia del suelo. Texcoco, Estado de México. 252 pp.
- García Gallegos, E., Vázquez Cuecuecha, O. G., Guerra-De la Cruz, V., & Cocolletzi 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: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i78.1385>.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Coyoacán, D. F., México. 90 p. [En línea]. Disponible en: <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>. (10 de octubre de 2023).
- García-Osorio, M. T., F. O. Plascencia-Escalante, G. Ángeles-Pérez, F. Montoya-Reyes y L. Beltrán-Rodríguez. (2020). Producción y tasa de descomposición de hojarasca en áreas bajo rehabilitación en El Porvenir, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 26(3). DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632099>.

- 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 pp
- Garrido Valero, M. ^a Soledad y Gobierno de España Ministerio de agricultura. (1994). Interpretación de análisis de suelos. Madrid: El ministerio.
- Ginés, I., & Mariscal Sancho, I. D. L. (2002). Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo.
- Godínez, S. M., Rodríguez, F. A., López, N. P., & Camposeco, J. (2016). Evaluación de la regeneración natural de tres especies coníferas en áreas de distribución natural en el altiplano occidental de Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 3(1). DOI: <https://doi.org/10.36829/63cts.v3i1.119>.
- González Irineo, R. E. (2013). Evaluación de la calidad del suelo para diferentes usos y cubiertas vegetales en la ladera Este de Cerro Grande, comunidad Dexcani Alto, municipio de Jilotepec. Facultad de planeación urbana y regional. (Tesis Licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México. 116 p.
- González-Chávez, M. C. A., Gutiérrez-Castorena, M. C., & Wright, S. (2004). Hongos micorrízicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 507-514.
- González-Delgado, M., Foroughbakhch Pournavab, R., Rocha Domínguez, L., Guzmán Lucio, M. A., & González Rodríguez, H. (2017). Composición florística y caracterización estructural del matorral desértico micrófilo en Galeana, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(39). DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i39.45>.
- González-Elizondo, S., González-Elizondo, M., & Cortes-Ortiz, A. (1993). Vegetación de la reserva de la biosfera La Michilia, Durango, México. *Acta Botánica Mexicana*, 22. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm22.1993.668>.
- Graciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., & Luján-Soto, J. E. (2017). Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste

de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12). DOI: <https://doi.org/10.19136/era.a4n12.1114>.

Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., & Domínguez-Pereda, L. A. (2013). Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(2). DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.08.052>.

Hoth, J., (2015). Año Internacional del Suelo: retos para México. *Mitt. (Mitteilungsblatt) México*, junio - julio 2015 Nr. 647: 2-5.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1986). Síntesis geográfica del estado de Nuevo León. INEGI. Benito Juárez, D. F., México. 8 p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2021). Aspectos geográficos, Nuevo León. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/> [Fecha de acceso: 2 de octubre del 2023].

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2014). Uso de suelo y vegetación. In Serie VI. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/> [Fecha de acceso: 5 de octubre del 2023].

IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103*. FAO, Roma.

Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>.

Jury, W. A., & Horton, R. (2004). *Soil physics* (6ta ed.). John Wiley & Sons, INC.

Kouli, M., Souplos, P., & Vallianatos, F. (2009). Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environmental geology*.

- Kuchler, A. W., Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, H. (1976). Aims and Methods of Vegetation Ecology. *Geographical Review*, 66(1), Jan., pp. 114-116. DOI: <https://doi.org/10.2307/213332>.
- Lacasta, C., Benítez, M., Maire, N., & Meco, R. (2006). Efecto de la textura del suelo sobre diferentes parámetros bioquímicos. In VII Congreso SEAE: Agricultura y Alimentación Ecológica. Toledo, España.
- Lamprecht, H. (1990). *Silvicultura en los trópicos: los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas, posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Alemania.
- Lecona-Urrutia A.A. (2000). *Ecología y medio ambiente*. México, D. F., McGraw-Hill Interamericana. [En línea]. Disponible en: https://books.google.co.cr/books/about/Ecolog%C3%ADa_y_medio_ambiente.html?id=1JQlnQAACAAJ&redir_esc=y [Fecha de acceso: 11 de septiembre del 2023].
- Llorente Sánchez, M. (2004). *Caracterización física y química de vertisoles del noreste de México sometidos a distintas formas de manejo*. Facultad de Ciencias Forestales. (Tesis Doctorado). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- López-Aguilar R., Murillo-Amador B., Benson-Valle-Meza G. (2002). *Manual de Análisis Químicos de Suelos*. Editorial. Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste S.C. La Paz, B.C.S. México.
- López-Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Monarrez-Gonzalez, J. C., González-Tagle, M. A., & Jiménez-Pérez, J. (2017). Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. *Madera Bosques*, 23(1). DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311518>.
- Luters A., Salazar J. C., Plaza L., (2000). *Soil Quality Test Kit Guide (Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo)*, Argentina.
- Marcus, N., Woods, S., Simmons, S., Jester, N., Wand, D., Wiedeman, M., & Morey, C. K. (2011). *Piñon-Juniper Ecology*. www.coloradoforests.co.

- Margalef, R. (1958). Information theory in ecology. *Society for General Systems Research*. 3: 36-71.
- Margalef, R. (1972). Homage to Evelyn Hutchinson, or why there is an upper limit to diversity. *Connecticut Academy of Arts and Sciences*.
- Marimón, J. M., & Viza, A. L. (1995). Estudio de cuatro adaptaciones escolares de método de observación y determinación de la textura del suelo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 3(1), 35-39.
- Marroquín, J. (1976). Vegetación y florística del Noreste de México. I. Aspectos sinecológicos en Coahuila. *Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 69–102.
- Marroquín-Castillo, J. J., Alanís-Rodríguez, Eduardo., Jiménez-Pérez, Javier., Aguirre-Calderón, O. A., Mata-Balderas, José. M., & Collantes Chávez-Costa, Alejandro. (2016). Composición florística y diversidad de un área restaurada post-minería en el matorral espinoso tamaulipeco. *Polibotánica*, no.42, Agost., pp.1-17. DOI: <https://doi.org/10.18387/polibotanica.42.1>.
- Martens, S. N., Breshears, D. D., & Barnes, F. J. (2001). Development of species dominance along an elevational gradient: Population dynamics of *Pinus edulis* and *Juniperus monosperma*. *International Journal of Plant Sciences*, 162(4). DOI: <https://doi.org/10.1086/320772>.
- Martínez Marulanda, A. C. (2015). Requerimientos nutricionales del ají *Capsicum annum* L. y su relación con rendimiento bajo condiciones ambientales de Palmira, Valle del Cauca. Facultad de Ciencias Agropecuarias. (Tesis doctorado). Universidad Nacional de Colombia, 88 p.
- Martínez Soto, R. A. (2020). Caracterización fisicoquímica de un Chernozem bajo diferentes usos del suelo en el noreste de México. (Tesis Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Martínez-Garza, C., Juan-Baeza, I., León-Carvajal, K., & Hernández-Hernández, M. (2022). La regeneración del bosque después de un incendio. *Inventio*, 18(44). DOI: <https://doi.org/10.30973/inventio/2022.18.44/9>.
- Mata Balderas, J.M, Cavada Prado, K.A, Sarmiento Muñoz T. I y H. González Rodríguez. (2022). “Monitoreo de la supervivencia de una reforestación con especies nativas del matorral espinoso tamaulipeco”. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71), pp. 28-52. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1229>.

- Matteucci, S. D. y Colma A. (1982). Metodología para el estudio de la vegetación. Argentina, Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/44553298>. [Fecha de acceso: 4 de abril del 2023].
- Mendoza, C. D., Atencio, C. H., & Sánchez, K. P. (2018). Características físico químicas de suelos con relación a su conformación estructural. *Investigación e innovación en ingenierías*, 6(1), 58-69. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.6.1.2775>.
- Meza-Pérez, E., & Geissert-Kientz, D. (2006). Estabilidad de estructura en andisoles de uso forestal y cultivados. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 163-170.
- Mora, J. L., & Lázaro, R. (2014). Seasonal changes in bulk density under semiarid patchy vegetation: The soil beats. *Geoderma*, 235–236, 30–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.022>.
- Mora-Donjuán, C. A., Rubio Camacho, E. A., Alanís Rodríguez, E., Jiménez Pérez, J., González Tagle, M. A., Mata Balderas, J. M., & Mora Olivo, A. (2014). Composición y diversidad vegetal de un área de matorral desértico micrófilo con historial pecuario en el noreste de México. *Polibotánica*, 38. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62131503003>. [Fecha de acceso: 5 de octubre del 2023].
- Navar-Chaidez, J., & González-Elizondo, S. (2009). Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica*, 27, 71–87. [En línea]. Disponible en: <https://polibotanica.mx/index.php/polibotanica/article/view/785>. [Fecha de acceso: 27 de octubre del 2023].
- Noellemeyer, E., Quiroga, A. R., Fernandez, R., Frasier, I., Alvarez, C., Álvarez, L., ... & Gómez, F. (2021). Guía para la evaluación visual de la calidad del suelo. Cátedra de Edafología y Manejo de Suelos, Universidad Nacional de La Pampa.
- Núñez, I., González-Gaudio, É., & Barahona, A. (2003). La biodiversidad: Historia y contexto de un concepto. *Interciencia*, 28(7). [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33908204>. [Fecha de acceso: 8 de septiembre del 2023].

- Oldeman, L.R. (1988). Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. Working paper 88/4. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, 151 pp.
- Orozco-Almanza, M. S., De León-García, L. P., Grether, R., & García-Moya, E. (2003). Germination of four species of the genus *Mimosa* (leguminosae) in a semi-arid zone of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 55(1). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(02\)00265-3](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(02)00265-3).
- Ortiz-Rodríguez, J. N. y D. A. Rodríguez-Trejo. (2008). Incremento en biomasa y supervivencia de una plantación de *Pinus hartwegii* Lindl. en áreas quemadas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 14(2):89-95. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182008000200003. [Fecha de acceso: 10 de octubre del 2023].
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo integral del suelo y Nutrición vegetal*, 1(4), 1-4.
- Palacios Vélez, E. (1963). Fórmula para obtener la curva de retención de humedad de suelo en función de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente. *Memorias del 1er Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo. 1: 32-48.
- Pavón, N. R., Ballato-Santos, J., & Pérez-Pérez, C. (2011). Germinación y establecimiento de *Mimosa aculeaticarpa* var. *biuncifera* (Fabaceae-Mimosoideae). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(2). DOI: <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.2.461>.
- Peralta-Kulik, N., Pérez de Molas, L., & Amarilla R, S. M. (2018). Análisis estructural de un bosque de la Ecorregión Alto Paraná, Paraguay. *Investigación Agraria*, 20(2). DOI: <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2018.diciembre.127-135>.
- Porta Casanellas, J., Lopez-Acevedo M., & Poch Claret, R., M., (2019). *Edafología: uso y protección de suelos* (4ta ed.). Mundi-Prensa Libros.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo M., & Roquero de la Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3er ed.). Mundi-Prensa Libros.
- Prieto-Ruiz, J. Á., P. A. Domínguez-Calleros, E. H. Cornejo-Oviedo y J. D. Nívar-Cháidez. (2007). Efecto del envase y del riego en vivero en el establecimiento de *Pinus cooperi* Blanco en dos

condiciones de sitio. *Madera bosques*, 13(1), 79-97. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311237>.

Prieto-Ruiz, J. Á. y J. R. Goche T. (Comps.). (2018). *Las reforestaciones en México, problemática y alternativas de solución*. Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, Dgo., México. 80 p.

Quiñones-Aguilar, E. E., Hernández-Acosta, E., Rincón-Enríquez, G., & Ferrera-Cerrato, R. (2012). Interacción de hongos micorrízicos arbusculares y fertilización fosfatada en papaya. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 165-176.

Quiroga, A. R. & Bono A. (2012). *Manual de fertilidad y evaluación de suelos*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Edición 2012.

Ramos-Castillo, V. (2022). *Análisis de las comunidades vegetales del rancho experimental teseachi, zona de transición entre el bosque templado y el pastizal en el noroeste de Chihuahua, México*. Chihuahua, México.

Ramos-Reyes, J. C., Treviño Garza, E. J., Buendía Rodríguez, E., Aguirre Calderón, O. A., & López Martínez, J. I. (2017). Productividad y estructura vertical de un bosque templado con incidencia de incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(43). DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i43.66>.

Requena, A. M., & Toranzo, J. O. (2015). *Manejo del riego*. EEA Alto Valle, INTA.

Reyes-Carrera, S. A., Méndez-González, J., Nájera-Luna, J. A., & Cerano-Paredes, J. (2013). Producción de hojarasca en un rodal de *Pinus cembroides* Zucc. en Arteaga, Coahuila, México y su relación con las variables climáticas. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(1), 147-155. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.01.006>.

Rodríguez-Trejo, D. A. (2021). *Semillas de Especies Forestales*. Chapingo, Edición de División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

Romero-Manzanares, A., Flores-Flores, J. L., Luna-Cavazos, M., & García-Moya, E. (2012). Effect of slope and aspect on the associated flora of pinyon pines in central Mexico. *Southwestern Naturalist*, 57(4). DOI: <https://doi.org/10.1894/0038-4909-57.4.452>.

- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay.
- Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2006). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10778/163>. [Fecha de acceso: 1 de febrero del 2024].
- Sánchez L., L. A. (2008). Influencia de la zanja trinchera en el estado hídrico y crecimiento en reforestaciones del área de Perote, Veracruz. (Tesis de Maestría). Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Texcoco, Edo. Méx., México. 58 p
- Saxton, K.E; Rawls W.J, Y. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Science Society of America Journal. 70:1569-1578.
- Schlichting, E. & Blume, H.-P., (1966). Bodenkundliches Praktikum. Parey, Hamburg.
- SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Secretaría De Medio Ambiente Y Recursos Naturales. Diario Oficial, (Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis), 85. En línea: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/1/nom-021-semarnat-2000.pdf>.
- SEMARNAT. (2010). Prácticas de reforestación: Manual básico. 1ª ed. Comisión Nacional Forestal. Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos. Marketing grup. [En línea]. Disponible en: https://www.conafor.gob.mx/BIBLIOTECA/MANUAL_PRACTICAS_DE_REFORESTACION.PDF. [Fecha de acceso: 10 de octubre del 2023].
- SEMARNAT. (2018). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [En línea]. Disponible en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>. [Fecha de acceso: 10 de octubre del 2023].
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1948). "The mathematical theory of communication", The Bell System Technical Journal, Vol. 27, Jul-Oct., pp. 379-423.

- Siebe, C., Jahn, R., Stahr, K. (1996). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo 4ª ed. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., Chapingo, Estado de México, 57 p.
- Singer, M. & D. Munns. (1999). Soil an Introduction. Cuarta Edición. Prentice Hall. USA
- Soler, P. E., Berroterán, J. L., Gil, J. L., & Acosta, R. A. (2012). Índice valor de importancia, diversidad y similaridad florística de especies leñosas en tres ecosistemas de los llanos centrales de Venezuela. *Agronomía Trop*, 62(1–4), 25–38.
- SPSS. (2009). Statistical Package for the Social Sciences. Chicago, IL. U.S.A.: SPSS Inc.
- Tejeda-Sartorius, D. (2017). Prácticas de conservación y restauración de suelos en climas húmedos. *Agro Productividad*, 10(1).
- Thompson, L. M., & Troeh, F. R. (2021). Los suelos y su fertilidad (4ta edición). Editorial Reverté, S. A.
- Torres-Guerrero, C. A., Etchevers, J. D., Fuentes-Ponce, M. H., Govaerts, B., León- González, F. D., & Herrera, J. M. (2013). Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra latinoamericana*, 31(1), 71-84.
- Torres-Rojo, J. M., Moreno-Sánchez, R., & Mendoza-Briseño, M. A. (2016). Sustainable Forest Management in Mexico. In *Current Forestry Reports* (Vol. 2, Issue 2, pp. 93–105). Springer International Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0033-0>.
- United Nations Convention to Combat Desertification, (2022). *The Global Land Outlook*, second edition. UNCCD, Bonn.
- Ureta, S., Oteagui, Á., & Llona, M. (2024). El SIRSD-S o los riesgos de una problematización productivista de los suelos degradados. *Revista de Geografía Norte Grande*, (88), 1-23. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022024000200104>.
- Urinovsky Irigoyen, K.M., Toledo, D.M., Arzuaga, S.A., Acosta, M.G.L., Contreras Leiva, S.M. (2021). Indicadores de calidad física en suelos del Chaco semiárido bajo distintos sistemas. *Agrotecnia* 31: 5-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.30972/agr.0315810>.

- USDA. (1999). Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys, 2nd Edition. In Landscape and Land Capacity. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook.
- Valenzuela-Núñez, L. M., & Granados Sánchez, D. (2009). Caracterización fisonómica y ordenación de la vegetación en el área de influencia de El Salto, Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente Aceptado*, 15(1). [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62916073004>. [Fecha de acceso: 15 de octubre del 2023].
- Vásquez-García, I., V. M. Cetina-Alcalá, R. Campos-Bolaños y L. F. Casal-Ángeles. (2016). Evaluación de plantaciones forestales en tres comunidades de la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Agroproductividad* 9(2):12-19. [En línea]. Disponible en: <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/716/585>. [Fecha de acceso: 20 de noviembre de 2023].
- Velazco-Macías, C. G., Alanis Flores, G. J., Alvarado Vázquez, M. A., Freire, L. R., & Pournavab, R. F. (2011). Flora endémica de Nuevo León, México y estados colindantes. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 5(1), 275–298. [En línea]. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/41972517>. [Fecha de acceso: 15 de octubre del 2023].
- Ventura-Ríos A., F. O. Plascencia-Escalante, P. Hernández-de la Rosa, G. Ángeles-Pérez y A. Aldrete. (2017). ¿Es la reforestación una estrategia para la rehabilitación de bosques de pino?: Una experiencia en el centro de México. *Bosque (Valdivia)* 38(1): 55-66. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000100007>.
- Wells, P. V. (1965). Scarp woodlands, transported grassland soils, and concept of grassland climate in the great plains region. *Science*, 148(3667). DOI: <https://doi.org/10.1126/science.148.3667.246>.
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 21(2–3), May., pp. 231-251. DOI: <https://doi.org/10.2307/1218190>.

- Woerner M. (1989). Método químico para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas. Facultad de Ciencias Forestales, Departamento Agroforestal, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares Nuevo León.
- Yáñez D. M. I. (2017). Caracterización ecopedológica en Vertisoles bajo cuatro sistemas de uso de suelo. Facultad de Ciencias Forestales. (Tesis Doctorado). Universidad Autónoma de Nuevo León. 111 p.
- Zavala-Cruz J., D.J. Palma-López, C. R. Fernández C., A. López C. y E. Shirma T. (2011). Degradación y conservación de suelos en la cuenca del Río Grijalva, Tabasco. Colegio de Postgraduados, Secretaria de Recursos Naturales y Protección Ambiental y PEMEX. Villahermosa, Tabasco, México. 90 p.