



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales
Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

**Establecimiento y evaluación de estrategias de reforestación
en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín en el
estado de Querétaro**

TESIS

Que como parte de los escritos para obtener el grado de
Maestra en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta

Alma Isabel Guzmán Molina

Dirigida por:

Dr. Víctor Hugo Cambrón Sandoval

Querétaro, Qro. octubre de 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ciencias Naturales
Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

Establecimiento y evaluación de estrategias de reforestación en las microcuencas
Ajuchitlancito y Ejido San Martín en el estado de Querétaro

Tesis

Que como parte de los escritos para obtener el grado de
Maestra en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta

Alma Isabel Guzmán Molina

Dirigida por:

Dr. Víctor Hugo Cambrón Sandoval

Presidente

M. en G. Hugo Luna Soria

Secretario

Dra. Diana Patricia García Tello

Vocal

Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero.

Suplente 1

Dr. José Carmen Soto Correa

Suplente 2

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

14 de octubre de 2024

México

Dedicatoria

*A Catalina, León y Rodrigo,
por su comprensión, apoyo incondicional y por ser siempre el motor de mi vida.*

Agradecimientos

A Rodrigo, mi compañero de vida, por su apoyo incondicional durante todo este proceso. Gracias por asumir con amor y dedicación el cuidado de nuestros hijos cuando yo debía concentrarme en la maestría, haciéndome ver que siempre puedo contar contigo.

A mi madre, por su amor incondicional y por ser mi mayor apoyo en cada etapa de mi vida. Gracias por siempre creer en mí.

A mis tías Ángeles y Maria Eugenia, por alentarme a seguir estudiando y por su valioso apoyo en el cuidado de mis hijos. Gracias por su amor y generosidad, que hicieron este logro posible.

Al Dr. Víctor Hugo Cambrón, por acompañarme durante este proceso, siempre abierto a compartir su experiencia y conocimiento. Gracias por su empatía ante mi situación laboral, por alentarme a seguir adelante y no rendirme.

Al maestro Hugo Luna por sus valiosas aportaciones para nutrir esta investigación.

Al Dr. José Carmen Soto, por su invaluable apoyo, dedicación y paciencia al guiarme en la realización y comprensión del análisis estadístico de este trabajo.

Al Dr. Juan Alfredo, por su paciencia en la revisión de este documento y por cada uno de sus valiosos comentarios y observaciones, que fueron fundamentales para la construcción y orden de este trabajo.

A la Dra. Diana García, por sus valiosos comentarios y por alentarme a seguir adelante en momentos difíciles, motivándome a no abandonar la maestría.

A Melanie Álvarez, por su incansable apoyo en el trabajo de campo. Gracias por tu dedicación y por los largos días de trabajo bajo el sol, siempre dispuesta a contribuir.

A Gonzalo y Octavio, por su apoyo, comprensión y por impulsarme a seguir estudiando. Gracias su respaldo durante toda la maestría y por confiar siempre en mis capacidades.

A la señora Silvia y a su familia, por abrir generosamente su espacio a la investigación, por su interés y compromiso con la regeneración de la tierra, y por su arduo trabajo en la plantación de los árboles.

Gracias a todos los voluntarios que participaron en las jornadas de reforestación, por su tiempo, dedicación y esfuerzo. Sin su colaboración, este trabajo no habría sido posible.

A mis compañeros de la maestría por su amistad, apoyo y todos los grandes momentos que pasamos juntos. Los atesoraré toda mi vida.

A todos los profesores que formaron parte de mi formación académica, por su dedicación, conocimiento y orientación a lo largo de este proceso. Gracias por compartir su experiencia y por contribuir al desarrollo de este trabajo con sus valiosas enseñanzas.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por brindarme la oportunidad de formar parte de su comunidad académica y por ofrecerme los recursos necesarios para llevar a cabo mis estudios de maestría. Su apoyo institucional fue fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Resumen

Esta investigación se centra en la evaluación de estrategias de reforestación en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín, ubicadas en el estado de Querétaro, con el objetivo de identificar la estrategia más adecuada para cada sitio. La reforestación es una práctica clave para restaurar áreas degradadas por la deforestación, que afecta el equilibrio eco-hidrológico y la biodiversidad de las cuencas. Se compararon plantaciones monoespecíficas y de ensambles ecológicos, con diferentes densidades, en dos zonas de estudio. Para ello, se realizaron actividades de preparación, plantación y monitoreo, con el fin de evaluar el porcentaje de supervivencia y el crecimiento de las especies.

Los resultados del análisis estadístico, obtenidos a los 9 meses de la plantación, mostraron que las plantaciones monoespecíficas, especialmente de *Prosopis laevigata* en la microcuenca Ajuchitlancito y de *Fraxinus spp.* en el Ejido San Martín, presentaron los mayores porcentajes de supervivencia. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre las especies o densidades de plantación. Se concluye que, aunque los datos son preliminares, los resultados proporcionan información valiosa para mejorar la planificación de programas de reforestación, destacando la importancia de adaptar las estrategias a las condiciones locales y especies utilizadas. Esta investigación contribuye al desarrollo de un modelo de gestión de cuencas basado en la sistematización de resultados, lo que puede mejorar la eficiencia de los recursos y aumentar el impacto positivo de las reforestaciones a largo plazo, favoreciendo la recuperación de los servicios ecosistémicos y la resiliencia de los ecosistemas.

Palabras clave: reforestación, ensamble ecológico, densidad de plantación, microcuenca.

Abstract

This research focuses on the evaluation of reforestation strategies in the Ajuchitlancito and Ejido San Martín micro-watersheds, located in the state of Querétaro, with the objective of identifying the most appropriate strategy for each site. Reforestation is a key practice to restore areas degraded by deforestation, which affects the eco-hydrological balance and biodiversity of the watersheds. Monospecific and ecological assemblage plantations, with different densities, were compared in two study areas. For this purpose, preparation, planting and monitoring activities were carried out to evaluate the percentage of survival and growth of the species.

The results of the statistical analysis, obtained 9 months after planting, showed that the monospecific plantations, especially *Prosopis laevigata* in the Ajuchitlancito micro-watershed and *Fraxinus spp.* in Ejido San Martín, presented the highest survival rates. However, no significant differences were found between species or planting densities. It is concluded that, although the data are preliminary, the results provide valuable information to improve the planning of reforestation programs, highlighting the importance of adapting strategies to local conditions and species used. This research contributes to the development of a watershed management model based on the systematization of results, which can improve resource efficiency and increase the positive impact of reforestations in the long term, favoring the recovery of ecosystem services and ecosystem resilience.

Key words: reforestation, ecological assemblage, planting density, micro-watershed.

Índice general

1. Introducción.....	10
2. Justificación.....	13
3. Objetivos.....	14
3.1. Objetivo general	14
3.2. Objetivos específicos.....	14
4. Marco Conceptual.....	15
4.1. Gestión Integrada de cuencas hidrográficas.....	15
4.2. Manejo de la cuenca.....	16
4.3. Reforestación.....	17
4.4. Proceso de reforestación.....	18
4.5. Ensamblajes ecológicos.....	19
4.6. Densidad de plantaciones.....	20
4.7. Selección de especies.....	22
5. Antecedentes de la reforestación en México.....	25
6. Área de estudio.....	29
6.1. Parámetros morfométricos de la microcuenca Ajuchitlancito.....	31
6.2. Parámetros morfométricos de la microcuenca Ejido San Martín.....	32
6.3. Zonas funcionales.....	34
7. Material y métodos.....	36
7.1. Primera etapa.....	37
7.2. Segunda etapa.....	43
7.3. Tercera etapa.....	44
8. Resultados y discusión.....	46
8.1. Actores clave.....	46
8.2. Estadística descriptiva.....	47
8.3. Análisis estadístico.....	50
9. Conclusiones.....	71
10. Recomendaciones.....	72
11. Referencias bibliográficas.....	73
12. Anexos.....	80

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación geográfica de la microcuenca Ajuchitlancito. Elaboración propia con datos de INEGI, 2023.	30
Figura 2 Mapa de ubicación geográfica de la microcuenca Ejido San Martín. Elaboración propia con datos de INEGI, 2023.	31
Figura 3.Curva hipsométrica de la microcuenca Ajuchitlancito. Elaboración propia 2023.	32
Figura 4.Curva hipsométrica de la microcuenca Ejido San Martín. Elaboración propia 2023.....	33
Figura 5. Mapa de zonas funcionales de la microcuenca Ajuchitlancito. Elaboración propia con datos de INEGI, 2024	35
Figura 6.Mapa de zonas funcionales de la microcuenca Ejido San Martín. Elaboración propia con datos de INEGI, 2024.	35
Figura 7 Diagrama general del monitoreo	36
Figura 8.Especies utilizadas y arreglo de las dimensiones utilizadas en el sitio 1 de la zona media del ejido Ajuchitlancito.....	39
Figura 9. Especie y arreglo de dimensión de la reforestación monoespecífica.....	40
Figura 10.Especies utilizadas y arreglo de las dimensiones utilizadas en el sitio 2 de la zona media del sitio Alameda del Rincón.	41
Figura 11.Especie y arreglo de dimensión de la reforestación monoespecífica.....	42
Figura 12. Porcentaje de supervivencia por sitios.	47
Figura 13. Altura promedio por sitio.....	48
Figura 14. Diámetro basal promedio por sitios..	50
Figura 15. Supervivencia, Altura y Diámetro basal por tratamiento en Ajuchitlancito. ..	53
Figura 16. Supervivencia, Altura y Diámetro basal por tratamiento en Ejido San Martín..	54
Figura 17. Diámetro basal por densidad en Ajuchitlancito... ..	55
Figura 18. Diametro basal por especie en Ajuchitlancito.....	58
Figura 19. Supervivencia, Altura y Diámetro basal.	59
Figura 20. Supervivencia, Altura y Diámetro basal de <i>Fraxinus</i> spp.	62

Figura 21. Diámetro basal por densidad de la especie <i>Fraxinus</i> spp.	63
Figura 22. Supervivencia por tratamiento de la especie <i>Prosopis levigata</i>	65
Figura 23. Altura y Diámetro basal por densidad.	66
Figura 24. Supervivencia y diámetro basal por tratamiento de <i>Pinus devoniana</i>	67
Figura 25. Supervivencia, Altura y Diámetro basal por densidad en <i>Pinus devoniana</i> .	68
Figura 26. Imagen aérea de la zona reforestada de la microcuenca Ajuchitancito, tomada por Luna-Soria 2023.	79
Figura 27. Imágen de la zona de reforestación en la microcuenca Ejido San Martín, tomada por: Luna-Soria, 2023	79

Índice de Tablas

Tabla 1. Periodos en los que se llevó a cabo el monitoreo de los sitios reforestados. .	44
Tabla 2. Análisis GLM para la supervivencia, altura y diámetro de las especies de árboles plantados en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín, en el estado de Querétaro a 9 meses de la plantación.....	51
Tabla 3. Análisis GLM para la supervivencia, altura y diámetro de la especie <i>Fraxinus</i> spp. plantada en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín, en el estado de Querétaro a 9 meses de la plantación.....	60
Tabla 4. Análisis GLM para la supervivencia, altura y diámetro de las especies <i>Prosopis laevigata</i> y <i>Pinus devoniana</i> plantadas en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín respectivamente, en el estado de Querétaro a 9 meses de la plantación.....	64

1. Introducción

Una cuenca hidrográfica es un espacio geográfico, definido por límites naturales (parteaguas), que recoge, almacena y conduce el agua de manera superficial hacia una sola salida y cuyo eje rector es el agua (Pineda et al., 2007). Dentro de las cuencas hidrográficas, la vegetación juega un papel fundamental para mantener su equilibrio eco-hidrológico y la estabilidad ambiental, ya que actúa como reguladora de los ciclos hidrológicos, protege los suelos de la erosión y contribuye a la biodiversidad (Cuevas et al., 2010).

En el estado de Querétaro, la cubierta vegetal constituye una amplia variedad, pero se encuentra bajo una intensa presión ejercida por las actividades humanas, como la agricultura, la ganadería, los asentamientos, la industria y las obras hidráulicas. Esta presión ha provocado el deterioro o la destrucción de amplias superficies de encinares, bosques de coníferas y bosques tropicales caducifolios, que están mermando rápidamente su extensión (Zamudio et al., 1992). La alteración de la cobertura vegetal en las cuencas no solo genera degradación ambiental, como la erosión del suelo, el azolve y la contaminación de los cauces, sino que también modifica el ciclo hídrico (Cuevas et al., 2010). En áreas con disturbios recurrentes e intensos, la vegetación no puede recuperarse de forma natural, por lo que es necesaria la intervención para estabilizar y mejorar el ambiente (SEMARNAT, 2010).

En este contexto, la reforestación emerge como una práctica que busca recuperar zonas donde la vegetación ha sido eliminada (Acosta et al., 2019). Sin embargo, en México, la mayoría de los programas de reforestación nacionales, como “ProÁrbol” (2007-2012) y el “Programa Nacional Forestal” (2013-2018), han dado más importancia al número de árboles plantados que a procesos esenciales como el mantenimiento y monitoreo de la vegetación reforestada. Esto ha resultado en tasas de supervivencia bajas, frecuentemente menores al 20% (Magallón, 2011). Por el contrario, proyectos locales han alcanzado tasas de supervivencia de hasta el 80%, gracias a la implementación de buenas prácticas, como diseños hidrológicos previos, la elaboración de cepas adecuadas y estrategias de largo plazo (Romero, 2022). Sin embargo, estos

esfuerzos locales evidencian que la concepción de la reforestación gubernamental no adopta un enfoque integral de cuenca.

Por otro lado, las cuencas Lerma-Chapala y Río Pánuco, de las cuales forma parte el estado de Querétaro, han perdido entre el 50% y 75% de sus sistemas naturales para la primera y entre el 25% y 50% para la segunda, debido a la alta presión de actividades humanas. Esto ha resultado en un índice bajo de conectividad ecológica (Cuevas et al., 2010). Aunque estas cuencas albergan importantes extensiones de vegetación primaria, esta se encuentra fragmentada, como ocurre en más de 300 cuencas y subcuencas en México (Cuevas et al., 2010; Hernández et al., 2010). La intensa urbanización, la producción agropecuaria intensiva, y la aceleración de procesos extractivos han agravado esta situación, contribuyendo al cambio climático, la pérdida de biodiversidad y el estrés hídrico (Romero, 2022).

Además, el desarrollo y la implementación de políticas públicas en materia de restauración forestal suelen enfrentarse a desafíos significativos. Las acciones de restauración a menudo dependen de múltiples agencias gubernamentales con intereses y planes que, en ocasiones, son contradictorios. La corta duración de los presupuestos y regulaciones administrativas, así como los conflictos con grupos locales por la gestión del territorio, dificultan el establecimiento de estrategias sostenibles y de largo plazo (González-Espinosa et al., 2011).

En este contexto, la presente investigación busca responder la pregunta: ¿Cuál es la estrategia de reforestación más adecuada para las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín? Con base en la importancia de la vegetación y la biodiversidad para el equilibrio eco-hidrológico de las cuencas, este trabajo propone que la reforestación no debe concebirse como una acción aislada, sino como un proceso integral orientado a recuperar la funcionalidad y estabilidad de las cuencas.

El objetivo del presente trabajo fue establecer y evaluar estrategias de reforestación en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín en el estado de Querétaro. En dos ecosistemas diferentes, se contrastaron dos tipos de reforestación a diferentes densidades: una basada en ensambles ecológicos, combinando diversas especies nativas, y otra basada en una sola especie, como es habitual en reforestaciones tradicionales. Se evaluaron porcentajes de supervivencia y variables de crecimiento con

el fin de identificar los factores que promueven una mejor adaptación de las plantas dentro de los ecosistemas de los sitios de estudio.

2. Justificación

La deforestación es uno de los principales problemas ambientales que contribuyen al cambio climático, generando efectos como climas extremos, aumento de la temperatura, desastres naturales, estrés hídrico y erosión del suelo. La pérdida de cobertura forestal no solo afecta a los ecosistemas locales, sino que también debilita la capacidad de los entornos naturales para mitigar fenómenos climáticos a nivel global. En muchas áreas, los disturbios ambientales han sido tan intensos que la vegetación ha perdido la capacidad de recuperarse de forma natural. Esto hace que sea esencial intervenir para asegurar los recursos naturales para las generaciones presentes y futuras, restaurando las funciones ecosistémicas y la biodiversidad en zonas afectadas.

Una de las estrategias más comunes para enfrentar esta problemática es la reforestación, implementada tanto por gobiernos como por organizaciones civiles. No obstante, muchos programas de reforestación están diseñados en función de los recursos económicos disponibles y de los tiempos gubernamentales, aspectos que suelen priorizar la cantidad de árboles plantados sobre la calidad y sostenibilidad de la intervención. En consecuencia, las características específicas de cada sitio suelen ser ignoradas. Esto genera prácticas de reforestación que, en muchos casos, se limitan a la plantación de una sola especie que puede ser ajena al ecosistema, sin dar seguimiento o monitoreo a largo plazo para evaluar el impacto real en el ambiente. Estas limitaciones pueden llevar a impactos negativos, desde la degradación de suelos hasta la pérdida de biodiversidad, así como al desperdicio de los recursos destinados a estas intervenciones.

El presente trabajo busca mejorar los procesos de reforestación mediante la evaluación de estrategias en dos zonas de estudio, utilizando una metodología científica y sistematizando los resultados. Al alejarse de los modelos establecidos, se pretende proponer estrategias que consideren las particularidades de cada uno de los sitios, ofreciendo alternativas más eficientes y adaptadas para propietarios, ejidatarios y organizaciones interesados en reforestar las microcuencas de Ajuchitlancito y Ejido San Martín.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general.

Establecer y evaluar estrategias de reforestación en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín en el estado de Querétaro.

3.2. Objetivos específicos.

1. Establecer reforestaciones con ensambles ecológicos y monoespecíficos, a diferentes densidades, en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín en el estado de Querétaro.
2. Realizar actividades de monitoreo en las reforestaciones establecidas para obtener porcentajes de supervivencia y variables de crecimiento.
3. Evaluar e identificar la estrategia de reforestación adecuada para cada sitio evaluado.

4. Marco conceptual

4.1. Gestión integrada de cuencas hidrográficas.

Las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por un parteaguas donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago o el mar (Cotler et al., 2013). Sus principales dimensiones son: la dimensión biofísica, en donde ocurren procesos biológicos y físicos; la dimensión ecológica, que atañe a la distribución espacial de las comunidades vegetales; la dimensión social, que involucra el establecimiento de asentamientos humanos, la intensidad de actividades productivas e industriales y el consecuente crecimiento económico, la construcción de normas y reglas para el acceso y distribución de agua y los recursos, y la creación y diseño de políticas públicas; y la dimensión de funcionalidad, que se refiere a la función hidrológica que desempeña (captación, almacenamiento o descarga hídrica) (Garrido et al., 2010).

Los criterios de zonificación de la cuenca se establecen de la siguiente manera (Garrido et al., 2010):

- Zona funcional alta: áreas aledañas a la divisoria de aguas en la porción altimétricamente más elevada de la cuenca; abarca sistemas de montaña y lomeríos. Son zonas clave para del manejo integrado de todo el sistema hidrográfico, pues es allí donde se infiltra una gran cantidad del agua que se precipita en la cuenca y que alimenta a los flujos subterráneos; igualmente, en esta zona surgen corrientes incipientes que nutren a los ríos y cuerpos de agua superficiales.
- Zona funcional media: área transicional entre la cuenca alta y la cuenca baja del sistema hidrográfico. Suelen ser áreas aptas para el almacenamiento hídrico pues la red de drenaje comienza a integrarse y robustecerse debido a la confluencia de afluentes de órdenes mayores. Es una zona de mezcla y transición hidrológica hacia las zonas de desembocadura o salida del sistema.
- Zona funcional baja: área de salida o emisión del sistema de drenaje, abarcando la porción altimétricamente más baja de la cuenca. Incluye las áreas aledañas al

cauce principal antes de su salida hacia el mar o algún cuerpo interno. En esta zona las corrientes comienzan a disminuir su velocidad y erosividad, transformándose en áreas de mayor estabilidad y depósito de sedimentos, es el área que desaloja el agua de todo el sistema hacia el mar o a un cuerpo de agua interior.

En los territorios de las cuencas existen interrelaciones de interdependencia espacial y temporal entre el medio biofísico (suelo, ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica), los modos de apropiación (tecnología y/o mercados) y las instituciones (organización social, cultura, reglas y/o leyes) (Cotler et al., 2013). La cuenca es considerada como un sistema de relaciones bio-social, pues contiene tanto subsistemas sociales como biológicos, que se relacionan entre sí de manera tal que la modificación de alguno de los elementos afecta toda la dinámica interna del conjunto. Estos territorios y su elevada biodiversidad otorgan bienes y servicios ambientales invaluable y fundamentales para nuestra existencia, las formas de vivir de los actores en su vida cotidiana repercuten a corto, mediano o largo plazo en su ambiente (El Maíz más Pequeño A.C. y SEDEA, 2020) y cualquier intervención tiene potencial de generar un desequilibrio que pone en riesgo a toda la vida que habita dentro la cuenca.

Las cuencas son territorios donde participan varios elementos en sus múltiples procesos, la vegetación es un elemento de alta importancia y juega un papel prioritario en su equilibrio y conservación. Por esta importancia, todas las vertientes de las cuencas deben manejarse manteniendo una cobertura vegetal suficiente que permita amortiguar la precipitación, controlar la erosión y las inundaciones. Partiendo de lo mencionado anteriormente, radica la importancia de recuperar la vegetación en las zonas altas y medias de las cuencas.

4.2. Manejo de la cuenca

El objetivo primordial del manejo de una cuenca es lograr un uso racional de los recursos naturales que en ella existen, considerando al hombre y la comunidad como el agente protector o destructor (Ramakrishna, 1997). El manejo integral con enfoque de cuenca se logra con la ordenación de las áreas y sus usos de la parte alta a la parte baja

(Vanegas, 2016). En una cuenca hidrográfica, el proceso de degradación se puede localizar en las laderas, o en los cauces y los valles. En términos prácticos, es prioritario iniciar los procesos de reforestación en las partes altas de las cuencas, pues si éstas se encuentran desprotegidas, los procesos erosivos pueden afectar los resultados de las plantaciones establecidas en las secciones medias o baja. En los casos donde las masas forestales de las partes altas no tienen problemas de degradación, los procesos de restauración podrían realizarse inicialmente en la sección media de la cuenca (Vanegas, 2016).

El manejo integral de cuencas con enfoque de sistema es un instrumento idóneo para planificar proyectos territoriales estratégicos (en donde en caso de ser necesario, se incluyan proyectos de restauración forestal), y constituye un marco para el análisis de los procesos ambientales como consecuencia de las decisiones en materia de uso y manejo de los recursos naturales proporcionando mayores resultados que las acciones sectoriales aisladas y dispersas de poco o nulo impacto (Cotler y Priego, 2004).

4.3. Reforestación

México es el cuarto país con mayor riqueza biológica (Espinosa, 2008), pero su biodiversidad está seriamente amenazada por la destrucción de ecosistemas y el deterioro de cuencas (Vanegas, 2016). Los subsistemas de las cuencas biológico, físico, económico y social están interrelacionados, de modo que el desequilibrio en uno afecta a los demás (Ramakrishna, 1997). Por ejemplo, la deforestación en la parte alta de una cuenca puede causar erosión e inundaciones en las zonas medias y bajas durante las lluvias (Vanegas, 2016).

En este sentido, México enfrenta procesos crecientes de deforestación, pérdida y degradación de los ecosistemas, generalmente relacionados con los avances de las fronteras agrícola y pecuaria. A través de los años la demanda de terrenos para agricultura, ganadería, desarrollos urbanos y turísticos ha destruido totalmente o degradado grandes superficies forestales, hoy convertidas en inmensos problemas ecológicos. Como consecuencia de estos procesos de degradación, existen grandes áreas en las que los disturbios han sido tan intensos y recurrentes que se ha eliminado de manera total cualquier posibilidad de que la vegetación recupere su estado original

por medios naturales. De acuerdo con esto, es necesario intervenir para facilitar la estabilización de las condiciones actuales del ambiente y promover su mejoramiento a través de diversas prácticas y actividades como la reforestación (SEMARNAT, 2019).

A lo largo de los años se han realizado diferentes concepciones y prácticas sobre la reforestación. En diversas ocasiones se ha concebido como un evento aislado o un procedimiento estándar. La reforestación es un proceso para revegetar zonas deforestadas donde antes hubo vegetación y cuyo objetivo es contribuir en la recuperación de la funcionalidad y el equilibrio eco-hidrológico de una cuenca (Acosta et al., 2019).

4.4. Proceso de reforestación

De acuerdo con lo planteado anteriormente es un error concebir a la reforestación como una acción aislada sino más bien un proceso integral. Dentro de este proceso existen varias dimensiones que hay que considerar para lograr una reforestación exitosa:

- i) Dimensión de planeación: en la cual se selecciona el lugar, la temporada y las especies adecuadas de reforestación tomando en cuenta la diversidad y la sucesión vegetal (Romero, 2022).
- ii) Dimensión de preparación: en la que se realiza el diseño hidrológico del sitio, brechas cortafuego, capacitación para la plantación, entre otras actividades.
- iii) Dimensión de cuidado: que atañe al cuidado de las plantas previo a su plantación (riego, fertilización, mantenimiento, entre otros), durante el transporte y en su periodo de aclimatación.
- iv) Dimensión técnica: que involucra las prácticas adecuadas de plantación.
- v) Dimensión de protección y mantenimiento: en la que se procura la protección de los árboles plantados contra el ganado y labores como podas, fertilización, control de maleza y replantación.
- vi) Dimensión de evaluación y monitoreo: en donde se da seguimiento al estado, condiciones y resultados de la plantación.
- vii) Dimensión social: que involucra la participación de la gente y apropiación comunal del proceso (SEMARNAT 2010).

Para lograr una reforestación exitosa y sostenible, es crucial considerar no solo la revegetación de un área sino también la restauración de su compleja estructura ecológica. Las diversas dimensiones de la reforestación, como la planificación cuidadosa, la selección adecuada de especies y el mantenimiento continuo, contribuyen a la recuperación funcional de los ecosistemas. En este proceso, la integración de ensambles ecológicos resulta fundamental, ya que una comunidad de plantas que refleja la biodiversidad del paisaje natural mejora la estabilidad y la resiliencia del área reforestada. De esta manera, la reforestación con especies autóctonas y adaptadas al entorno local no solo protege los recursos hídricos y del suelo, sino que también fomenta una red ecológica robusta que soporta la vida silvestre y promueve la regeneración del ecosistema en su totalidad.

4.5. Ensamblajes ecológicos

La biodiversidad del paisaje y la flora cumple diversas funciones dentro del ecosistema, como proteger el recurso hídrico, cuidar el suelo, reducir la erosión hídrica y eólica, y mejorar las condiciones para la vida silvestre, lo que se conoce como objetivo protector de la reforestación. Según experiencias de repoblamiento tradicional, este objetivo se logra mejor con especies autóctonas, adaptadas al entorno local (Acosta et al., 2019). En este sentido, la plantación de especies diversas que emulan un ecosistema natural mejora la adaptación, el desarrollo y la supervivencia de las plantas (Acosta et al., 2019).

La teoría de acoplamiento o ensamblaje inicialmente fue concebida como la noción de que las especies no ocurren aleatoriamente, sino que están reguladas por interacciones competitivas y actualmente pretende explicar la existencia de sitios ambientalmente similares con diferentes conjuntos de especies (Gómez et al., 2014). Esta teoría supone que las especies tienen requerimientos similares a nivel de nichos y, por lo tanto, la formación de la comunidad es el producto de fluctuaciones azarosas de un grupo común de especies. Sin embargo, se reconoce que la concurrencia de especies es, en parte, un producto de la casualidad, donde los patrones históricos de la especiación y la migración, la distribución geográfica, los factores y las interacciones bióticas continuamente se producen, sin que ninguno de estos procesos se excluya mutuamente (Gómez et al., 2014).

Las mezclas de especies usualmente están menos propensas a daños debidos a agentes bióticos como son, las plagas y enfermedades (Musálem y Fierros, 1993). Los rodales mezclados probablemente utilizan el suelo en forma más efectiva, aunque esto no ha sido bien probado. No hay evidencia de que los sistemas radiculares de diferentes especies se estratifiquen como lo hacen sus copas, pero algunos penetran más que otros y, por lo tanto, pueden extraer agua y nutrientes de niveles más profundos. Estos nutrientes finalmente retornan al suelo a través de las hojas y, eventualmente, estarán al alcance de todos los miembros de la mezcla. En cuanto a valores estéticos, el hábitat para la fauna silvestre y las posibilidades de usos múltiples, son mayores y mejores, en forma general, en los rodales mezclados (Musálem y Fierros, 1993).

En el estado natural, los cambios en la estructura y la composición de un bosque son el resultado de la constante demanda que tienen cada árbol por más espacio y de la muerte de otros individuos. La competencia entre árboles de una misma especie no afecta la composición de un bosque, y tiene efectos mínimos en la sucesión forestal. En cambio, la competencia entre individuos de especies diferentes da como resultado la transformación natural de una comunidad forestal a otra. La competencia se efectúa tanto en lugares de posibilidad equivalente como en los desiguales, y tanto a nivel de las copas como en el sotobosque (Musálem y Fierros, 1993).

4.6. Densidad de plantaciones

La densidad de plantaciones es un concepto fundamental en las estrategias de reforestación, ya que se refiere al grado de ocupación del espacio por los árboles en un área determinada y puede expresarse en número de individuos, área basal o volumen por unidad de superficie (Musálem y Fierros, 1993). Este parámetro tiene implicaciones directas en la competencia intraespecífica e interespecífica, lo que a su vez influye en el desarrollo y la supervivencia de los árboles, así como en el éxito de la restauración ambiental.

De acuerdo con Becerra (1986), la densidad puede determinarse a través de indicadores como el área del fuste, el diámetro normal, el volumen, la altura dominante y la cobertura del dosel, entre otros, los cuales permiten evaluar el grado de ocupación

del espacio de crecimiento. Esto es clave para establecer índices de densidad adecuados que favorezcan un balance óptimo entre la cobertura forestal y la disponibilidad de recursos, evitando densidades excesivas que incrementen la competencia o densidades demasiado bajas que comprometan los objetivos de restauración ecológica (Corvalán y Hernández, 2006).

Cuando dos árboles ocupan la misma localización, inevitablemente compiten por recursos como luz, agua y nutrientes, afectando mutuamente su desarrollo (Musálem y Fierros, 1993). Si la densidad es demasiado alta, la competencia será tan intensa que el desarrollo de los árboles se verá comprometido, y la población tenderá a ajustarse a la capacidad de carga del sitio. Este concepto implica que el ambiente solo puede soportar un número limitado de individuos antes de que la competencia genere una mortalidad significativa (Linding, 2017). En este proceso, los individuos más robustos suelen sobrevivir a expensas de los más débiles o suprimidos.

En los proyectos de reforestación, es esencial considerar los efectos de la densidad en el diseño de las estrategias. Una densidad adecuada asegura que los árboles tengan suficiente espacio y recursos para desarrollarse, optimizando su crecimiento y contribución a la restauración ambiental. Por ejemplo, en rodales coetáneos, la competencia por luz, humedad y nutrientes depende en gran medida de la densidad, y la competencia entre raíces puede ser intensa, aunque difícil de observar (Musálem y Fierros, 1993; Spurr y Barnes, 1980). Además, como señalan Álvarez y Márquez (1995), existe una relación estrecha entre el tamaño de los individuos y su número por unidad de superficie, lo cual refleja las interacciones competitivas en el tiempo.

La densidad no siempre tiene efectos negativos. En ciertas etapas del desarrollo, una mayor densidad puede aumentar la fertilización cruzada y mejorar la supervivencia de los propágulos (Linding, 2017). Sin embargo, con el tiempo, estos beneficios pueden revertirse si no se implementan prácticas de manejo como podas y aclareos intermedios, que son cruciales para mantener el equilibrio en el sistema y maximizar la efectividad del ensamblaje ecológico (Musálem y Fierros, 1993).

En el contexto de la restauración de cuencas, la elección de la densidad de plantación es crucial para lograr un ecosistema equilibrado y resiliente. Una densidad adecuada no solo asegura el éxito en la cobertura vegetal y la estabilización hídrica, sino

que también minimiza los efectos negativos de la competencia, promoviendo la sostenibilidad y la funcionalidad ecológica a largo plazo.

4.7. Selección de especies

La selección de especies es uno de los aspectos más críticos en el proceso de reforestación, ya que determina en gran medida el éxito del proyecto y el logro de sus metas. Una selección inadecuada puede resultar en la imposibilidad de alcanzar los objetivos planteados. Para restablecer un ecosistema similar al natural, es fundamental seleccionar las especies entre aquellas que históricamente han existido en el área objetivo. La información disponible, como floras y listados florísticos, constituye una herramienta valiosa tanto para la planificación de la recolección de semillas como para guiar la selección de especies (Linding, 2017).

Desde una perspectiva de conservación de la biodiversidad, resulta evidente la preferencia por utilizar especies nativas, especialmente aquellas propias de la región donde se desarrollan los trabajos de reforestación (Segura, 2005). Según la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2023), una especie nativa es aquella que se encuentra en su área de distribución natural, donde ha evolucionado de manera autónoma y se considera propia de una región geográfica específica.

En el estado de Querétaro, las comunidades vegetales se agrupan principalmente en ecosistemas como el bosque tropical caducifolio, donde predominan árboles de baja estatura (4-12 m) que presentan un marcado cambio estacional. Durante la época seca, estos árboles pierden sus hojas, mientras que en la temporada de lluvias generan un denso follaje verde. Entre las especies arbóreas características de este ecosistema destacan *Prosopis laevigata*, *Eysenhardtia polystachya* y *Fraxinus rufescens*, mientras que *Acacia farnesiana* se encuentra entre las especies arbustivas (Zamudio et al., 1992).

El mezquite (*Prosopis laevigata*) tiene una distribución significativa en las zonas áridas y semiáridas de México, cubriendo aproximadamente 3,555,500 hectáreas. Es una especie emblemática del centro del país y se encuentra ampliamente distribuida en Querétaro, donde su sistema radicular profundo y amplio le permite adaptarse a ambientes secos, contribuyendo a la conservación del suelo y al reciclaje de nitrógeno como leguminosa (Rodríguez et al., 2014).

Por su parte, el huizache (*Acacia farnesiana*) también es una especie representativa de Querétaro. Según Hernández y Martínez (2017), esta planta, que se encuentra en diversas regiones del estado, desempeña un papel importante en la retención de suelos erosionados y en la infiltración de agua, lo que la convierte en una opción ideal para proyectos de restauración en zonas semiáridas.

Eysenhardtia polystachya se distribuye en gran parte del país, principalmente en los estados de Colima, Chiapas, Chihuahua, Coahila, Estado de México, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas, en un rango amplio de altitud que va desde los 150 a los 3000 m.s.n.m. Esta especie es capaz de crecer en suelos erosionados y es tolerante a la sequía, podría utilizarse para el rescate ecológico en zonas áridas y subhúmedas del país (CONABIO, 1992).

En los ecosistemas templados y semicálidos de Querétaro también se encuentran diferentes pinos y especies del género *Quercus*, que suelen cohabitar en bosques mixtos debido a sus afinidades ecológicas similares. Sin embargo, los pinares naturales han disminuido significativamente, dejando pequeños remanentes que pueden considerarse vestigios de bosques antiguos en áreas como el municipio de Amealco (Zamudio et al., 1992).

Pinus devoniana Lindl. es un pino que se distribuye en el territorio mexicano: Colima, Chiapas, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Estado de México, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas. Habita en zonas de clima templado cálido, con una precipitación anual de 1,000 a 1,500 mm; en altitudes de 1,500 a 2,500 m (Sáenz et al., 2012).

Pinus pseudostrobus es una de las especies más utilizadas en proyectos de reforestación en México y se desarrolla principalmente en las entidades del centro, como Morelos, Puebla, Hidalgo, Estado de México, y en los sureños de Oaxaca, Chiapas y Guerrero. Se localiza en comunidades vegetales de bosque de coníferas y bosque de pino-encino (Viveros et al., 2006), sin embargo, fuera de su ambiente natural presenta gran variación en su rendimiento y desarrollo (Ferreira et al., 1972).

El área de distribución natural del fresno se extiende por el área central occidental de México. La mayoría de su distribución natural en México se encuentra arriba de los

2,400 m.s.n.m. Los tipos de bosque en los cuales se encuentra el fresno se ven dominados usualmente por los encinos y también crece a lo largo de corrientes de agua junto (Francis, 1990).

La selección de estas especies para las estrategias de reforestación no solo responde a su capacidad de adaptación a las condiciones ambientales locales, sino también a su contribución a la restauración de los servicios ecosistémicos, como la conservación del suelo, la infiltración de agua y la promoción de la biodiversidad. Este enfoque basado en el uso de plantas nativas garantiza una mayor sostenibilidad y resiliencia de los sitios de reforestación.

5. Antecedentes de la reforestación en México

La historia de la degradación ambiental en la zona centro de México es similar a la de otras regiones del mundo. Las actividades agrícolas, la ganadería, el uso de madera para energía, construcción y comercialización han provocado la pérdida de la cobertura vegetal, resultando en erosión, pérdida de fertilidad del suelo y disminución de la biodiversidad (SEMARNAT, 2019). A finales de la década de 1980, surgió una gran preocupación por el ritmo de la deforestación en México, ya que varios estudios locales y regionales reportaron tasas superiores al 10 % anual, respaldadas por el informe de la FAO sobre los recursos forestales en países en desarrollo (Navarro-Salas, 2014). Estos resultados alertaron a los investigadores, lo que llevó a realizar diferentes análisis de la pérdida de cobertura forestal a nivel nacional. Aunque cada estudio presenta tasas distintas, hay consistencia en estimar una pérdida anual de alrededor de 700,000 hectáreas de vegetación forestal en México (Navarro-Salas, 2014).

Se ha documentado la casi desaparición del bosque tropical caducifolio (BTC), pero su estado actual sigue siendo incierto. El estado de Querétaro, parte de la región Bajío, enfrenta una fuerte presión por el cambio de uso de suelo debido a la actividad de empresas constructoras, lo que ha resultado en una disminución significativa de la superficie del BTC. Esta pérdida puede conllevar la desaparición de especies arbóreas con potenciales beneficios económicos y ecológicos, cuyos usos son actualmente desconocidos o poco aprovechados (Cambrón et al., 2019).

Diversas políticas públicas han contribuido al deterioro de los bosques al promover el desarrollo agropecuario en regiones forestales. Por ejemplo, el Plan Nacional de Colonización incentivó a familias ganaderas a trasladarse al trópico húmedo veracruzano en las décadas de 1950 y 1960 para transformar las selvas en potreros. Ante la grave pérdida de bosques en México, desde hace más de dos décadas, el gobierno, organismos internacionales y organizaciones de la sociedad civil han impulsado programas para frenar la destrucción de los bosques; sin embargo, muchos han logrado resultados limitados (Ortega y Soares, 2021).

Los programas federales de reforestación han sido instrumentos de política que intentan abordar procesos causales específicos. Sin embargo, han introducido nuevas

fallas a la política forestal, como la reforestación en suelos no forestales y la falta de enfoque en áreas críticas para su restauración. Además, el bajo índice de supervivencia de los árboles plantados y el escaso apoyo a los productores que participan en estas campañas causan daños a largo plazo. Esta modalidad de transferencia de recursos más un subsidio que una compensación por trabajo continuo de restauración genera efectos negativos sobre la cultura productiva de las comunidades y sus estrategias económicas, además de resultar en una dilapidación de recursos públicos debido a los pobres resultados de los programas (Magallón, 2011).

En 2007, el programa “Proárbol” destinó \$74,337.90 pesos M.N. para reforestar 70 hectáreas con 56 mil árboles de eucalipto en San José de Gracia, Aguascalientes, de los cuales ninguno sobrevivió. En León, Guanajuato, se invirtieron \$148,675 pesos M.N. para plantar 66 mil árboles de pino en 60 hectáreas, y en abril de 2008 se constató que el 90 % de los árboles estaban muertos, el 9.8 % marchitos o enfermos y solo el 0.2 % sanos. La principal falla de la actual política forestal es no reconocer los procesos que causan la deforestación, lo que lleva a no priorizar su atención. Además, no se valoran adecuadamente los ecosistemas forestales y los beneficios que brindan, lo que contribuye a la acelerada pérdida de bosques (Magallón, 2011). Entender la incidencia de las políticas públicas en el pasado y en la actualidad es crucial para lograr la restauración de los ecosistemas. El gobierno es un actor fundamental tanto en el deterioro como en la conservación del entorno y los recursos. A través de políticas públicas se proveen incentivos y restricciones para el uso, aprovechamiento y explotación de los recursos naturales, y el hecho de que no se actúe sobre una problemática (Vanegas, 2016).

Las políticas públicas nacionales en materia de uso y restauración de los bosques a menudo dependen de directrices generales dictadas por organismos internacionales de desarrollo, cuyos objetivos frecuentemente son contradictorios. Por ejemplo, organismos como las Naciones Unidas, el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo promueven el establecimiento de plantaciones de pino como la solución para maximizar el secuestro de carbono (Fahey et al., 2010). Sin embargo, este enfoque puede tener efectos perjudiciales sobre la biodiversidad regional, ya que la propagación de plantaciones monoespecíficas reduce la diversidad genética y ecológica de los

ecosistemas locales (González-Espinosa et al., 2011). Este tipo de políticas, aplicadas de manera jerárquica sin tener en cuenta las necesidades locales, contribuye al fracaso de los proyectos de reforestación. Además, la superposición de autoridades gubernamentales genera conflictos y competencia, lo que también afecta la efectividad de las intervenciones (González-Espinosa et al., 2011).

En este contexto, para que una reforestación sea exitosa, además de tomar en cuenta sus múltiples dimensiones, es necesario definir los parámetros con los cuales se evaluará el éxito de la plantación (SEMARNAT, 2019). En los proyectos de reforestación en México, la actividad de evaluación se ha centrado principalmente en la supervivencia de las plantas, sin embargo, desde el enfoque de la rehabilitación ecológica, es necesario evaluar otros atributos que midan la recuperación de la estructura y funciones del ecosistema (Ángeles-Pérez et al., 2017). Pocas reforestaciones en México han implementado sistemas de monitoreo y evaluación exhaustivos, uno de los pocos ejemplos es el caso de la reforestación en la microcuenca Santa Rosa Jáuregui, realizada en 2008. Este proyecto evaluó la supervivencia y crecimiento de especies del bosque tropical caducifolio y del matorral espinoso durante el primer año tras la plantación, obteniendo resultados prometedores en términos de crecimiento, aunque la supervivencia bajó drásticamente después de la sequía (Hernández, 2010).

En el año 2019, el colectivo ciudadano Reforestemos Qro., llevó a cabo una reforestación comunitaria en la comunidad de San Pedro, municipio de Huimilpan, Querétaro, con la participación de 400 voluntarios y una tasa de supervivencia superior al 80 % (Romero, 2022). Este éxito se atribuye a técnicas como el diseño hidrológico previo, la elaboración de cepas adecuadas y cajetes para aumentar la captación de agua, así como a una visión más holística y a una estrategia de largo plazo. Aunque se trató de una experiencia exitosa, no se sistematizaron los resultados ni se adoptó un enfoque de cuenca en la reforestación.

Un factor clave para el éxito de los proyectos de reforestación y restauración ambiental es la participación comunitaria. La crisis ambiental nos obliga a reflexionar sobre el papel crucial de las comunidades rurales en todas las etapas del proceso de reforestación. Las comunidades locales pueden y deben ser actores protagónicos en la

planificación, implementación y monitoreo de proyectos de restauración (Gómez et al., 2014).

6. Área de estudio

La microcuenca Ajuchitlancito se encuentra principalmente en la zona suroeste del municipio de Pedro Escobedo, con una pequeña porción que se extiende hacia el noreste del municipio de Huimilpan (Fig. 1).

Cuenta con un clima subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 18.4°C y la precipitación media anual es de 623.6 milímetros. La mayor parte de los suelos son vertisoles ricos en materia orgánica, aunque también se pueden encontrar litosoles en laderas y áreas desmontadas. Dentro de las áreas con vegetación predomina la selva baja caducifolia que en gran parte se encuentra alterada debido a las actividades agrícolas y pecuarias, y a la tala de algunas especies. Dentro de las especies predominantes se encuentra el palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*), el casahuate (*Ipomea murucoides*), el tepeguaje (*Lysiloma sp.*), el huizache (*Acacia sp.*), el granjeno (*Celtis sp.*), el copal (*Brusera sp.*), el garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) y el nopal (*Opuntia sp.*) (Tesorería Municipal de Pedro Escobedo, 2017). En la microcuenca Ajuchitlancito se ubican dos localidades principales, Ajuchitlancito y La Venta de Ajuchitlancito, junto con una porción de la localidad de San Fandila.

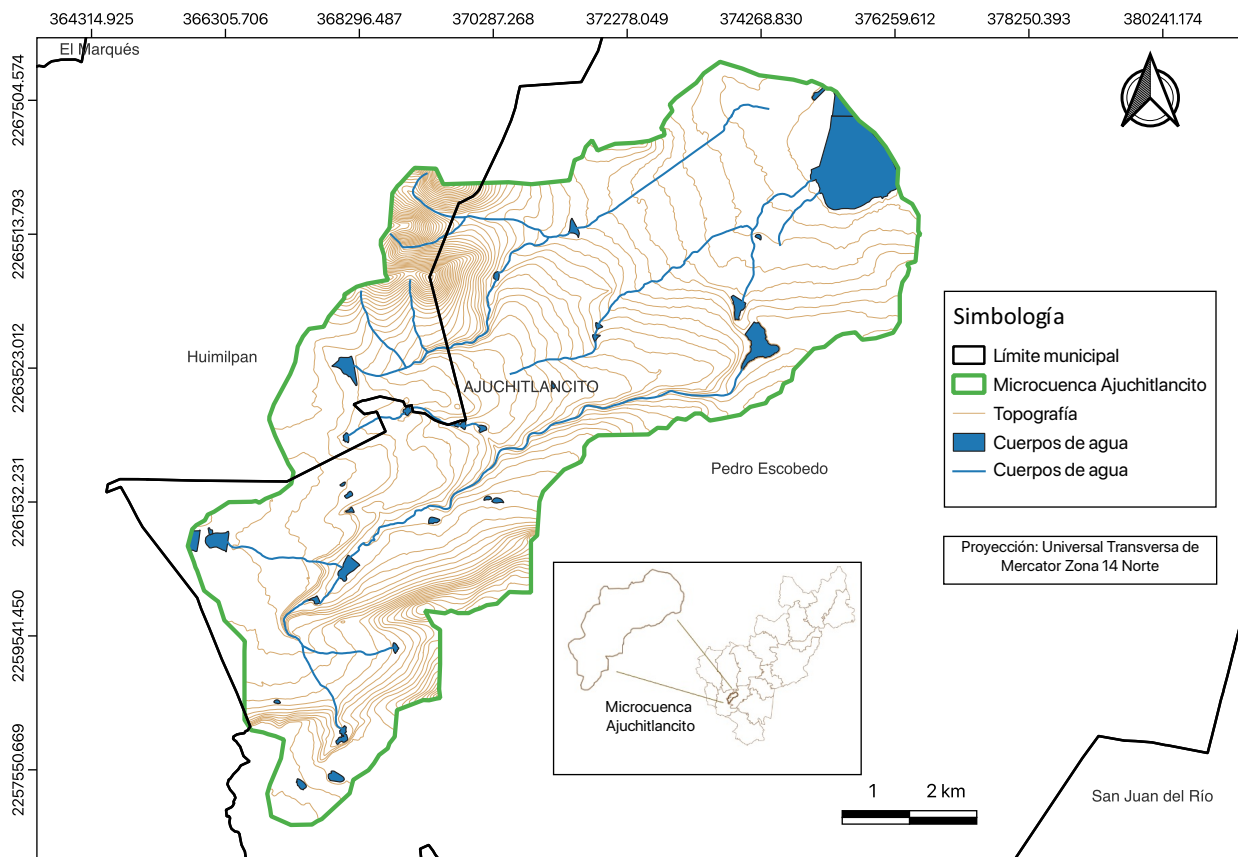


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica de la microcuenca Ajuchitlancito. Elaboración propia con datos de INEGI, 2023.

Por su parte, el Ejido San Martín presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual se registra en 15.1°C, mientras que la precipitación media anual alcanza los 659.5 milímetros, según datos del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) en 1996. Con relación al suelo, predomina el feozem y en cuanto a la vegetación, se destaca la presencia de bosque de pino encino, con extensas áreas de pastizal inducido, según información proporcionada por la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SEDESU) para el periodo 2015-2018. Por otro lado, la microcuenca Ejido San Martín engloba tres localidades distintas: El Baño, El Rincón y San Martín, según bases de datos del INEGI en 2010 (Fig. 2).

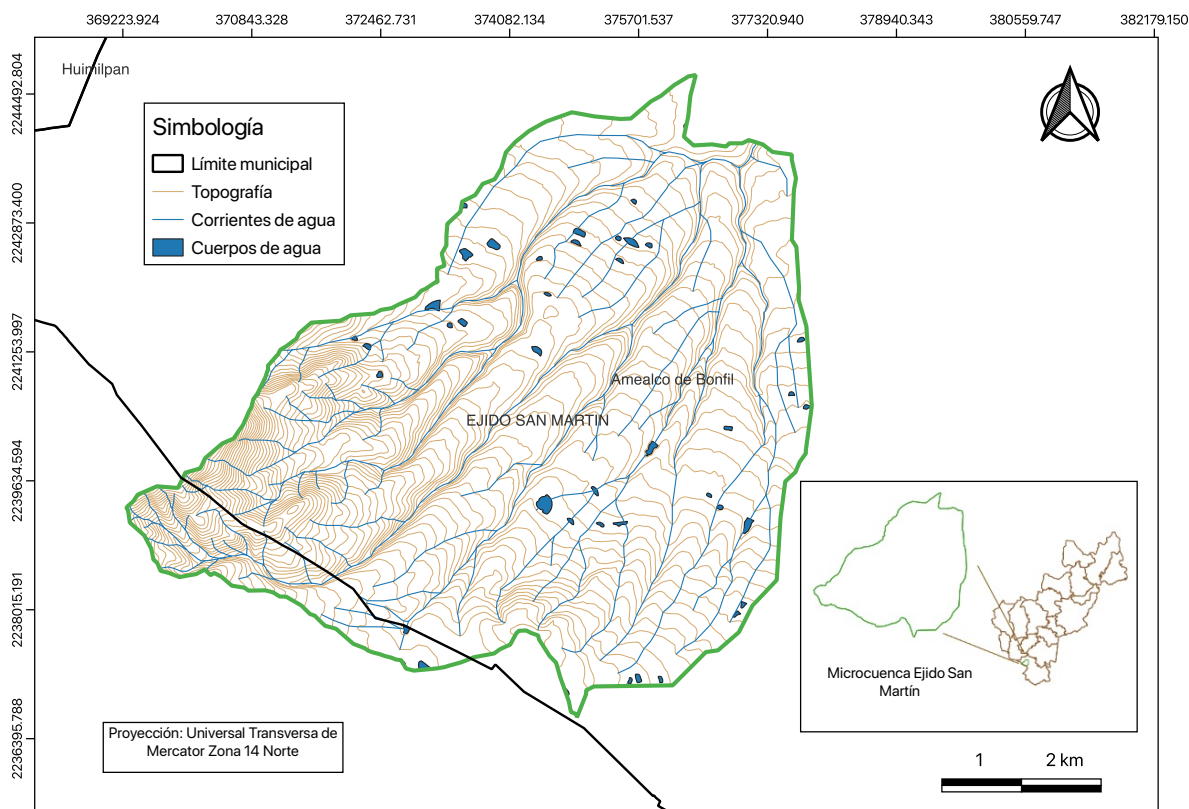


Figura 2 Mapa de ubicación geográfica de la microcuenca Ejido San Martín.
Elaboración propia con datos de INEGI, 2023.

6.1. Parámetros morfométricos de la microcuenca Ajuchitlancito

Al analizar los parámetros morfométricos de la microcuenca Ajuchitlancito se puede inferir su posible respuesta ante una precipitación mediante la interpretación de los indicadores morfométricos de forma, entre los cuales el área (53.11 km), el factor de forma (0.30), el coeficiente de compacidad (1.52), la relación de elongación (0.62), el índice de alargamiento (0.83) y el índice de homogeneidad (0.83) indicaron que el área de estudio puede clasificarse con respecto a su superficie como una microcuenca que tiende a ser alargada, aunque también con una forma oval oblonga a rectangular oblonga. El relieve de la cuenca se describió mediante la curva hipsométrica y la pendiente de la cuenca, los cuales están directamente relacionadas con su evolución geológica, la capacidad de infiltración del suelo, la recarga del acuífero y el aporte a la

escorrentía superficial que se desarrolla dentro de sus límites. De manera específica, la pendiente media de la cuenca es de 4.32%, eso indica un relieve accidentado, cuya altura media es de .17 km.

La curva hipsométrica permitió identificar la elevación media de 2,125 msnm y se puede clasificar como una cuenca madura o en equilibrio (Fig. 3).

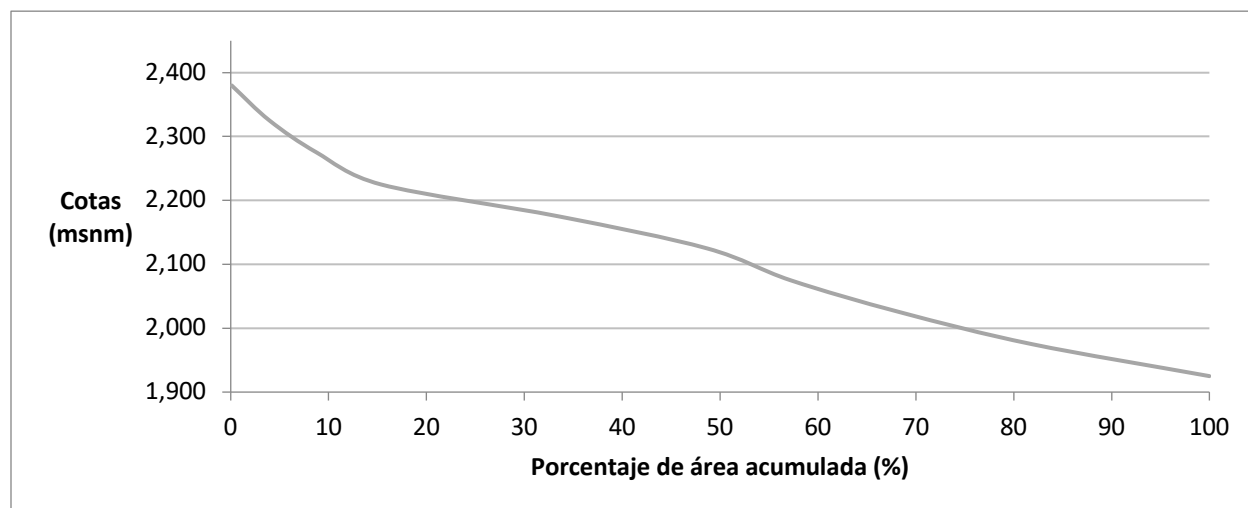


Figura 3. Curva hipsométrica de la microcuenca Ajuchitlancito. Elaboración propia 2023.

A través de los indicadores morfométricos sobre el drenaje, la cuenca se clasificó como exorreica con drenaje mayormente dendrítico, el cual es colectado por el cauce principal con una longitud de 16.7 kilómetros. El cauce principal es alimentado por diversas corrientes intermitentes y efímeras que clasifican a la cuenca con una red hídrica de cuarto orden, con relación de bifurcación de 3.38, densidad de drenaje buena de 2.8 km/km²; y densidad de corrientes de 3.84 corr/km², con lo anterior, la cuenca presenta una estructura con un drenaje cuyo tiempo de concentración es de 19.78 minutos, lo que indica que el agua de una precipitación extrema drena a velocidad moderada hacia el exutorio, haciéndola ligeramente propensa ante avenidas.

6.2. Parámetros morfométricos de la microcuenca Ejido San Martín

Asimismo, al analizar los parámetros morfométricos de la microcuenca Ejido San Martín se puede inferir su posible respuesta ante una precipitación mediante la interpretación

de los indicadores morfométricos de forma, entre los cuales el área (40.2 km), el factor de forma (0.56), el coeficiente de compacidad (1.27), la relación de elongación (0.84), el índice de alargamiento (0.87) y el índice de homogeneidad (0.68) indicaron que el área de estudio puede clasificarse con respecto a su superficie como una microcuenca que tiende a ser moderadamente alargada, aunque también con una forma oval redonda a oval oblonga. El relieve de la cuenca se describió mediante la curva hipsométrica, pendiente de la cuenca y su orientación, los cuales están directamente relacionadas con su evolución geológica, la capacidad de infiltración del suelo, la recarga del acuífero y el aporte a la escorrentía superficial que se desarrolla dentro de sus límites. De manera específica, la pendiente media de la cuenca es de 10.47%, eso indica un relieve accidentado, cuya altura media es de 20 km.

La curva hipsométrica permitió identificar la elevación media de 2,525 m.s.n.m. y se puede clasificar como una cuenca madura o en equilibrio (Fig. 4).

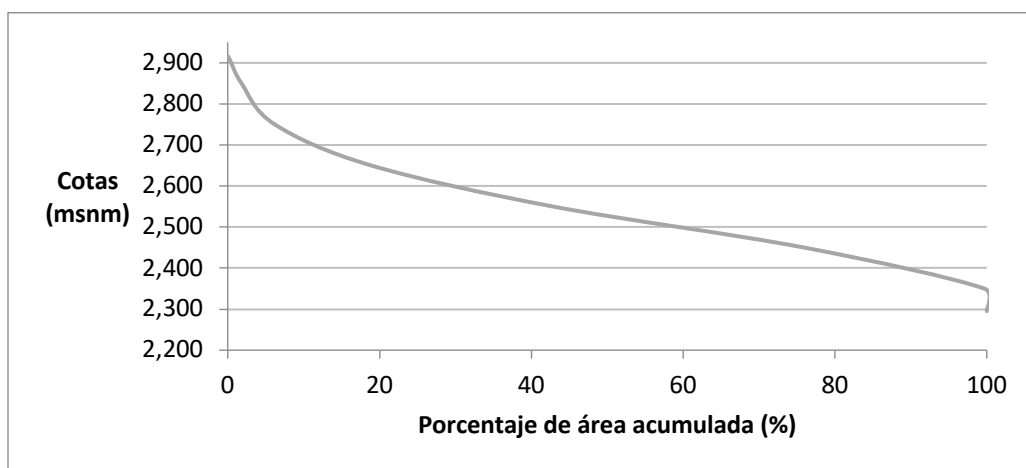


Figura 4 Curva hipsométrica de la microcuenca Ejido San Martín. Elaboración propia 2023.

A través de los indicadores morfométricos sobre el drenaje, la cuenca se clasificó como exorreica con drenaje mayormente dendrítico, el cual es colectado por el cauce principal con una longitud de 1.27 kilómetros. El cauce principal es alimentado por diversas corrientes intermitentes y efímeras que clasifican a la cuenca con una red hídrica de quinto orden, con relación de bifurcación de 2.88, densidad de drenaje buena de 2.94 km/km²; y densidad de corrientes de 3.70 corr/km², con lo anterior, la cuenca presenta una estructura con un drenaje cuyo tiempo de concentración es de 1.94

minutos, lo que indica que drena rápidamente el agua de una precipitación extrema hacia el exutorio, haciéndola medianamente propensa ante avenidas.

6.3. Zonas funcionales

La curva hipsométrica de cada una de las microcuencas de estudio permite identificar el comportamiento del relieve y señalar una primera aproximación para definir las zonas funcionales. Con base en el comportamiento del gradiente altitudinal y el área que acumula, se tiene una primera aproximación de la funcionalidad de la microcuenca, identificando que la zona funcional baja de la microcuenca Ajuchitlancito se localiza de los 1,900 a los 2,025 m.s.n.m., la zona media de los 2,025 a 2,225 m.s.n.m. y la zona alta de los 2,225 a 2400 m.s.n.m. Asimismo, la zona funcional baja de la microcuenca Ejido San Martín se localiza de los 2,290 a los 2,550 m.s.n.m., la zona media de los 2,550 a 2,650 m.s.n.m. y la zona alta de los 2,650 a 2,930 m.s.n.m.

A través de un análisis visual del perfil longitudinal del cauce principal y los órdenes de las corrientes conforme al cambio altitudinal, fue posible detallar los límites de las zonas funcionales en ambas microcuencas de estudio, identificando los cambios abruptos en el cauce del río y la presencia de nuevos órdenes. Todo ello resultó en una re-delimitación de las zonas funcionales. En la microcuenca Ajuchitlancito, la zona baja se encuentra de los 1,900 a 1,975 m.s.n.m. y tiene una superficie de 1,290.5 ha, la zona media de los 1,975 a 2,150 m.s.n.m. y cuenta con una superficie de 2,463.6 ha, y la zona alta de los 2,150 a 2,400 m.s.n.m. con una superficie de 1,557.1 ha (Fig. 5).

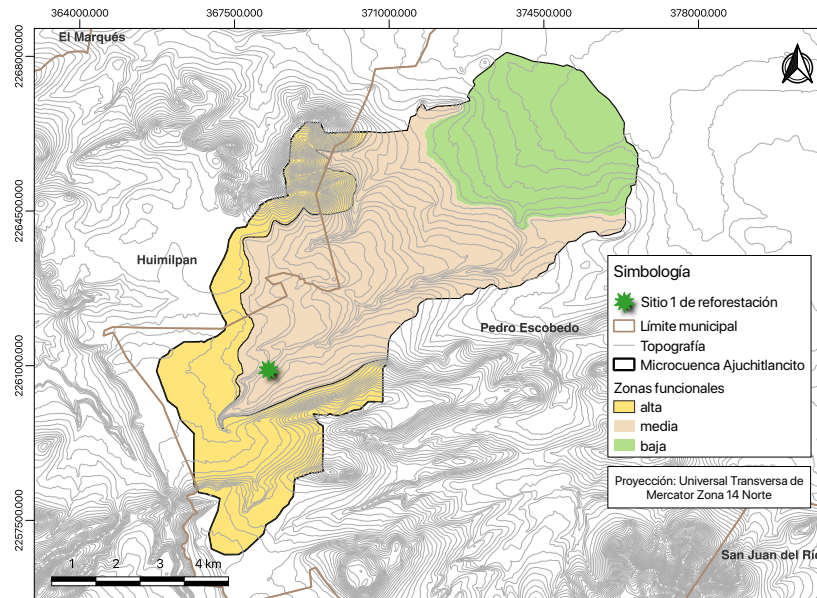


Figura 5 Mapa de zonas funcionales de la microcuenca Ajuchitlancito. Elaboración propia con datos de INEGI, 2024.

En la microcuenca Ejido San Martín, la zona baja se encuentra de los 2,290 a 2,310 m.s.n.m. y tiene una superficie de 225.1 ha, la zona media de los 2,310 a 2,510 m.s.n.m. y cuenta con una superficie de 2,193.4 ha, y la zona alta de los 2,510 a 2,930 m.s.n.m. con una superficie de 1,601.1 ha (Fig. 6)

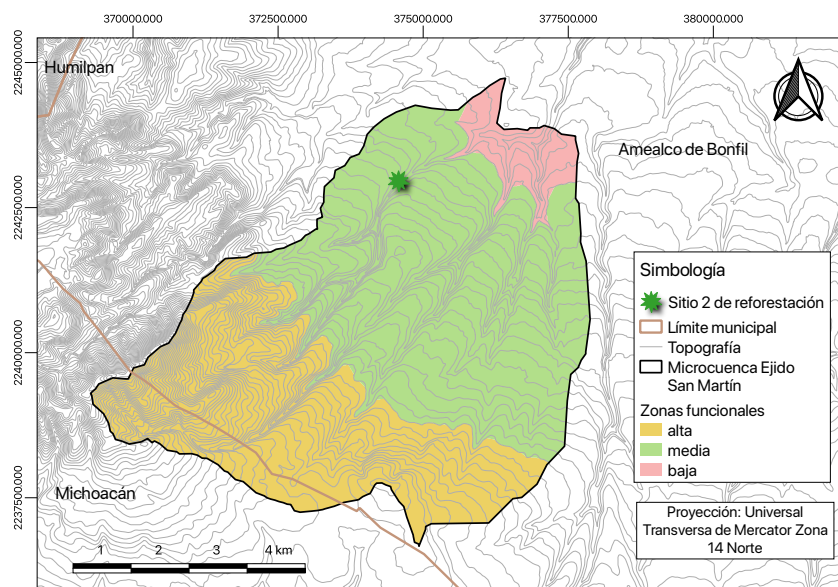


Figura 6. Mapa de zonas funcionales de la microcuenca Ejido San Martín. Elaboración propia con datos de INEGI, 2024.

7. Material y métodos

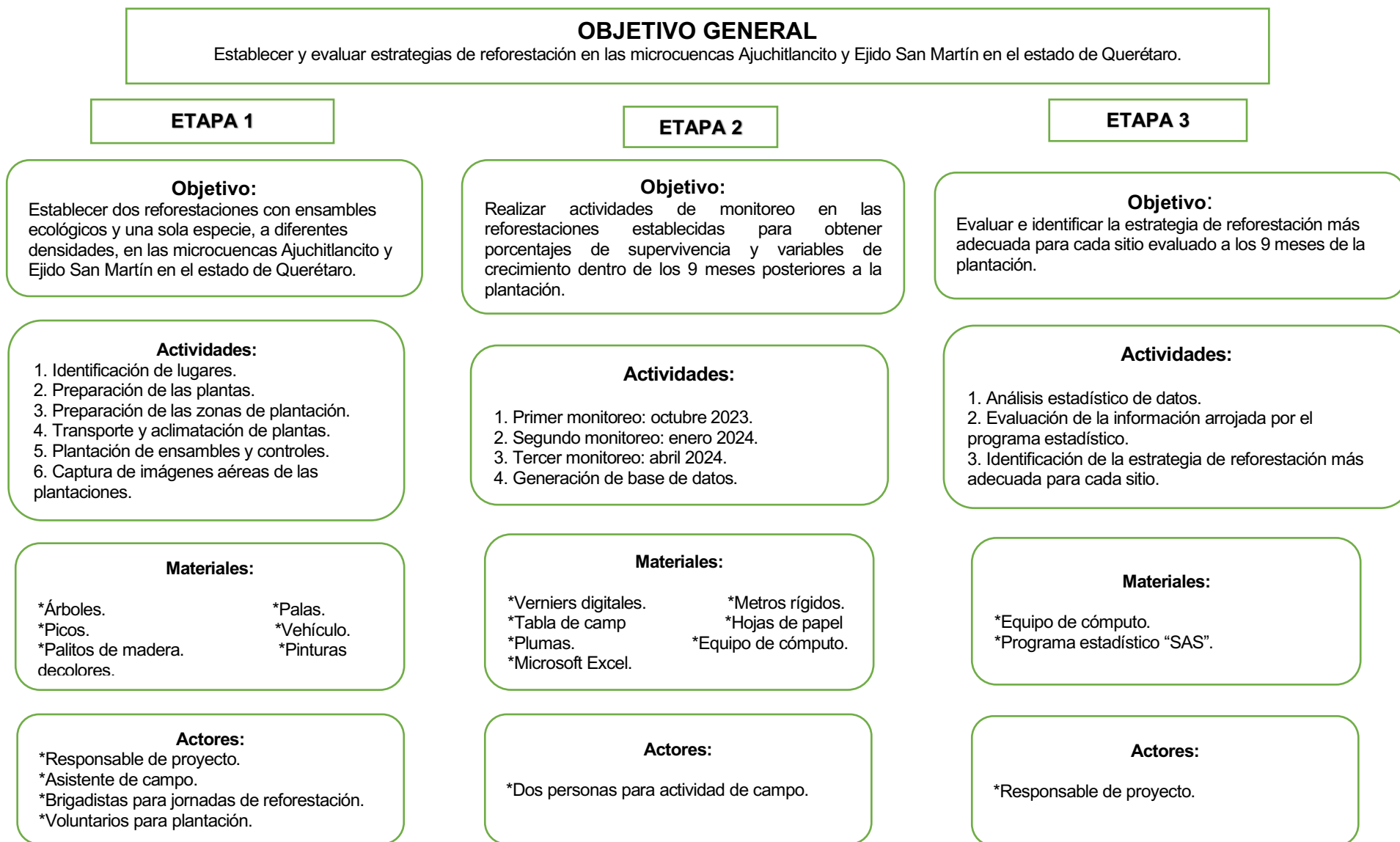


Figura 7 Diagrama general del monitoreo

7.1. Primera Etapa

Establecimiento de dos reforestaciones con ensambles ecológicos y una sola especie, a diferentes densidades, en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín en el estado de Querétaro.

Identificación de lugares.

Se identificaron los lugares para establecer los ensambles ecológicos dentro de diferentes municipios de Querétaro con las siguientes condiciones: ecosistema de interés, accesibilidad, superficie necesaria para la representatividad del estudio, dueños de los terrenos con interés y disposición para plantar y proteger el lugar, posibilidad de acceso para monitoreos y seguimiento en el periodo de estudio, y sin presencia de ganado en la zona.

Preparación de las plantas.

Las especies *Prosopis laevigata*, *Acacia farnesiana* y *Fraxinus spp.* recibieron cuidados y mantenimiento en el vivero de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), situado en el campus Amazcala. Por otro lado, las especies *Pinus devoniana*, *Pinus pseudostrobus* y *Eysenhardtia polystachya* estuvieron bajo cuidado y mantenimiento en los viveros de la organización Reforestando Ejidos México AC. Todas las especies utilizadas en este estudio fueron seleccionadas en los viveros con condiciones adecuadas de desarrollo y un tamaño similar.

Preparación de las zonas de plantación.

En cada uno de los sitios a reforestar se delimitaron las zonas específicas de plantación con rafia y estacas, y se marcaron los puntos en donde se plantó cada árbol a diferentes densidades, a 3 m, 2.5 m y 2 m de distancia entre árboles. Para marcar cada punto se utilizaron estacas pintadas de diferentes colores para identificar los sitios en donde se plantaron las diferentes especies.

Transporte y aclimatación de plantas.

Tres semanas antes de la plantación, se llevaron las plantas de los viveros a cada uno de los lugares de reforestación cuidando el correcto acomode de estas en los vehículos de carga con el fin de evitar un estrés excesivo. El tiempo de aclimatación en las zonas previo a la plantación tuvo como objetivo favorecer su adecuada y progresiva adaptación al ambiente.

Plantación de ensambles.

Se implementaron dos tipos de reforestación, estableciendo, por un lado, ensambles ecológicos que consiste en combinar diferentes especies nativas (Cambrón et al., 2018) y por otro, plantando solo una especie (monoespecíficas) como regularmente se hace en las reforestaciones tradicionales, con el fin de identificar los factores que llevan a las plantas a una mejor adaptación dentro del ecosistema. Estas plantaciones se llevaron a cabo en dos diferentes ecosistemas. En cada ecosistema se establecieron dos tratamientos, uno con ensambles y otro con plantaciones monoespecíficas. Así mismo, en cada tratamiento se implementaron tres diferentes densidades.

Diseño de reforestaciones

Sitio de reforestación 1: Ubicado en la zona media de la microcuenca, Dolores de Ajuchitlancito, Pedro Escobedo (Fig. 8 y 9)

Ecosistema: selva baja caducifolia.

Superficie: 1.4 ha

Número de plantas: 905

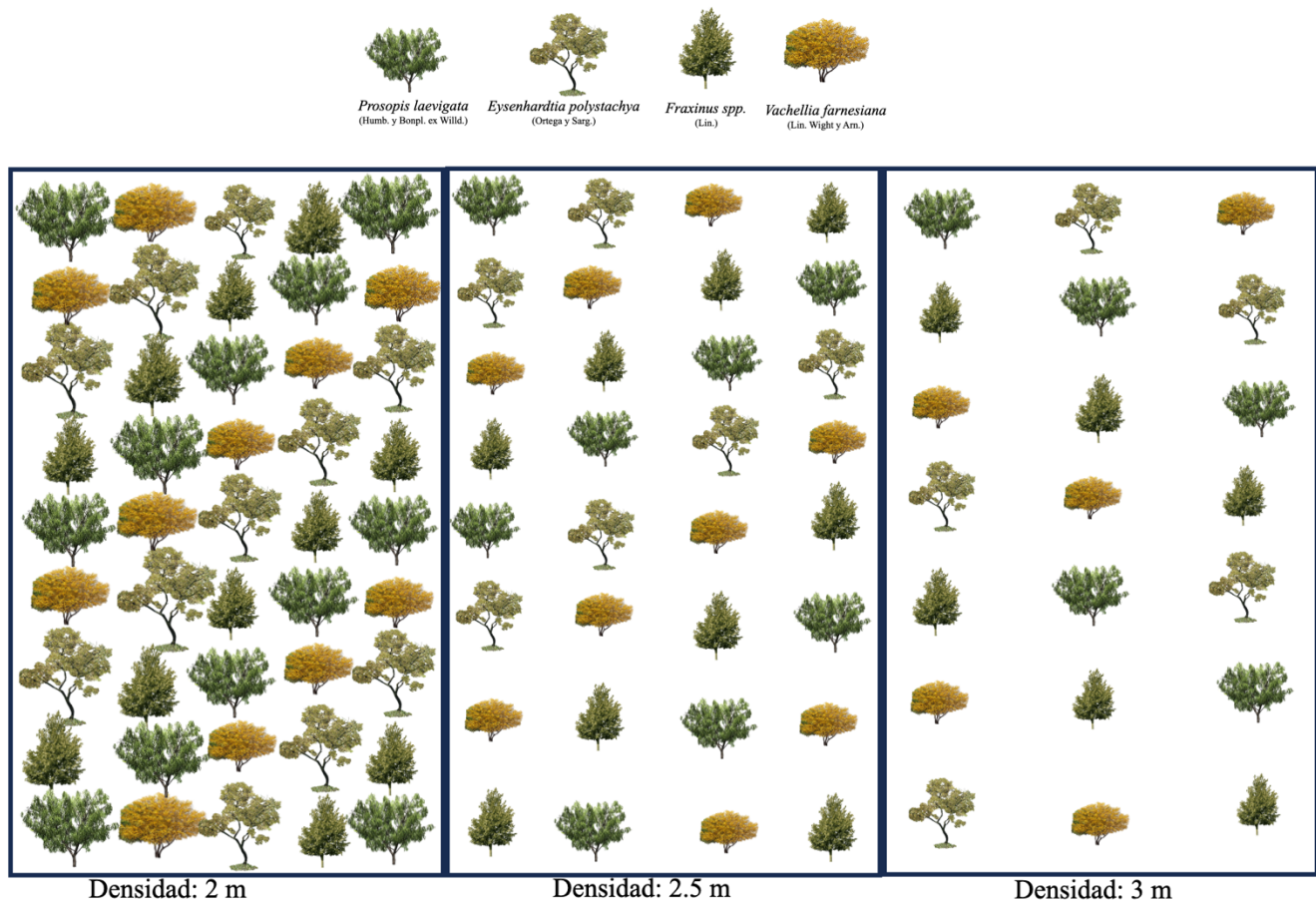


Figura 8. Especies utilizadas y arreglo de las dimensiones utilizadas en el sitio 1 de la zona media del ejido Ajuchitlancito



Prosopis laevigata
(Humb. y Bonpl. ex Willd.)

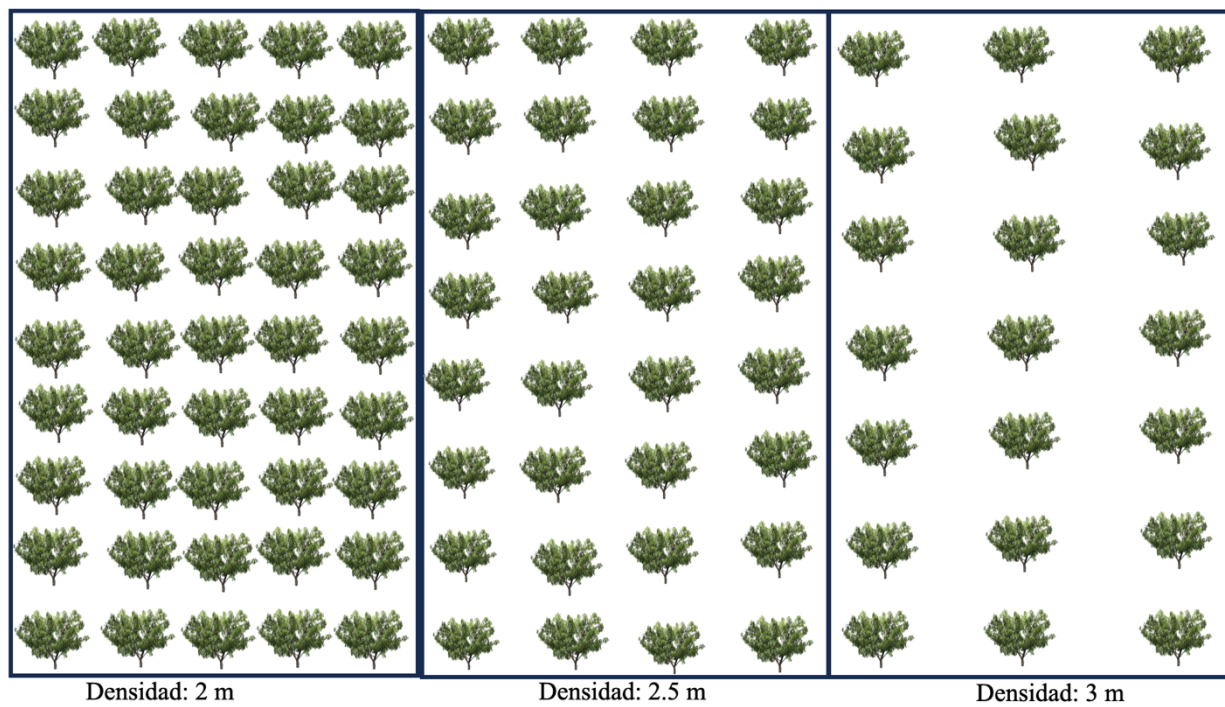


Figura 9. Especie y arreglo de dimensión de la reforestación monoespecífica.

Sitio de reforestación 2: Ubicado en la zona media de la microcuenca, Alameda del Rincón, Amealco (Fig. 9 y 10).

Ecosistema: bosque templado.

Superficie: 4 ha

Número de plantas: 1,654

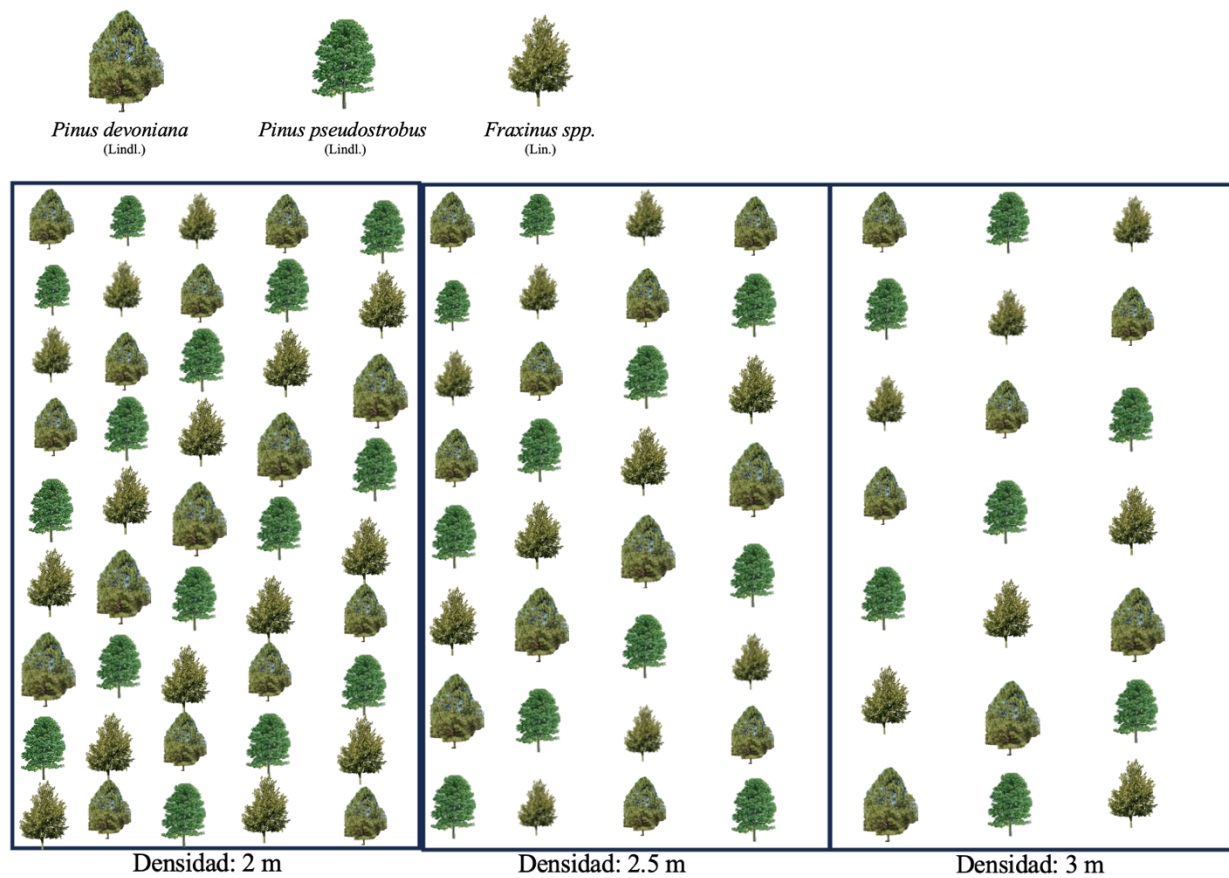


Figura 10 Especies utilizadas y arreglo de las dimensiones utilizadas en el sitio 2 de la zona media del sitio Alameda del Rincón.

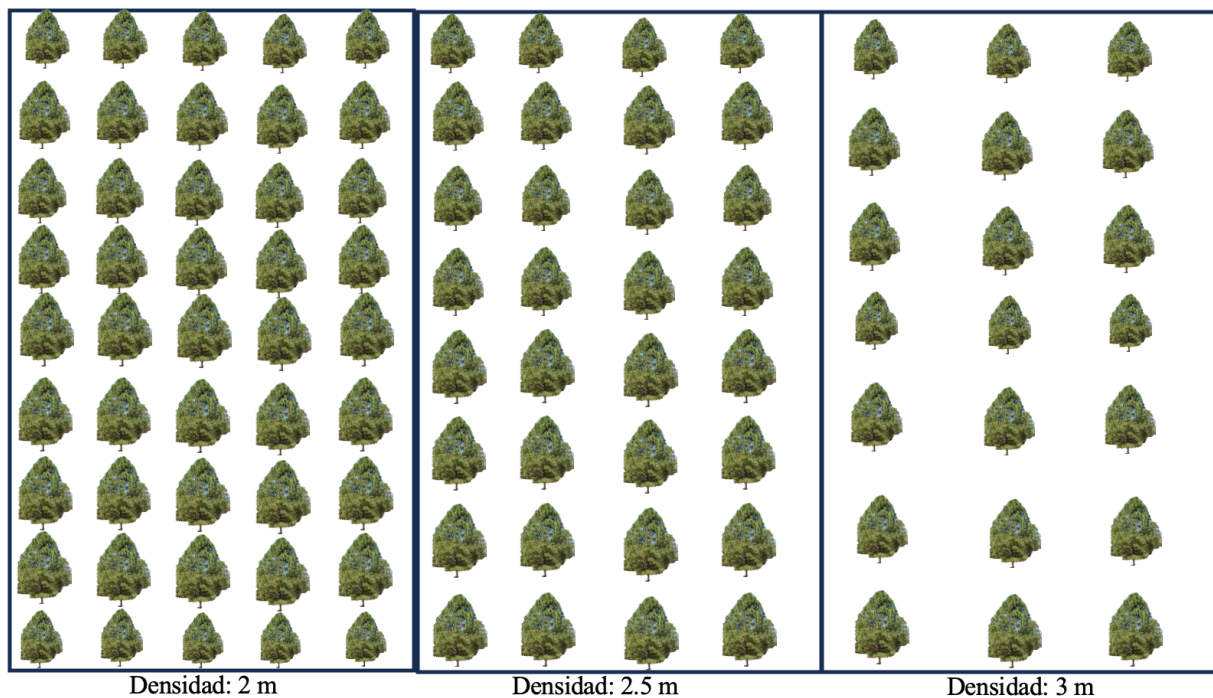
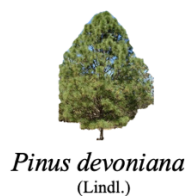


Figura 11. Especie y arreglo de dimensión de la reforestación monoespecífica.

Se llevaron a cabo ocho jornadas de reforestación en las que participaron aproximadamente 744 voluntarios provenientes de las comunidades cercanas a los lugares de reforestación y de la ciudad de Querétaro, en el periodo de junio a septiembre de 2023. Previo al inicio de cada reforestación, se realizó una sesión de capacitación dirigida a los voluntarios participantes con el propósito de instruirles en la técnica adecuada de plantación de árboles con el objetivo de garantizar que todos los árboles fueran plantados de manera uniforme conforme a las prácticas establecidas.

Técnica de plantación.

La técnica de plantación utilizada fue la recomendada por SEMARNAT en su manual *Prácticas de Reforestación 2010* y fue la siguiente:

1. Realizar una cepa con una profundidad de dos veces el tamaño del cepellón del árbol.
2. Introducir la tierra previamente sacada y adecuar la profundidad hasta que la parte superior del cepellón quede cuatro cm por debajo del nivel del suelo. Hacer pruebas colocando el árbol dentro de la cepa de ser necesario.
3. En caso de que el árbol esté embolsado: sujetando el árbol de cabeza, quitar la bolsa cuidadosamente evitando dañar las raíces o dejarlas expuestas por mucho tiempo.
En caso de que el árbol esté emplayado: separar cuidadosamente el cepellón individual del resto de los árboles evitando dañar las raíces o dejarlas expuestas por mucho tiempo.
4. Introducir cuidadosamente el árbol sin bolsa en la cepa sujetándolo con ambas manos.
5. Llenar por completo la cepa de tierra dejándola a nivel del suelo.
6. Comprimir con manos o pies la tierra dentro de la cepa sin compactar demasiado.
7. Realizar un cajete alrededor de la cepa con la finalidad de captar agua.
8. Acolchar el cajete con hojas o hierbas secas de ser posible.

Por último, para documentar las reforestaciones realizadas en cada sitio, se tomaron fotografías aéreas utilizando un dron modelo DJI Mavic 3M (ANEXO1).

7.2. Segunda etapa

Se implementaron actividades de monitoreo en las reforestaciones establecidas para obtener porcentajes de supervivencia y variables de crecimiento (Tabla 1). Para la evaluación de los ensambles comparados con la reforestación tradicional (monoespecíficas), se tomaron las siguientes variables de respuesta; I: Supervivencia, que consistió en el conteo de plantas vivas durante el monitoreo; II: Altura de la planta, en donde se tomó con la ayuda de un flexómetro desde el suelo hasta el ápice de la planta en cm; y III: Diámetro basal, para el cuál se utilizó un Vernier digital posicionado aproximadamente a 5 cm de la superficie de la base del suelo en cm.

Tabla 1. Periodos en los que se llevó a cabo el monitoreo de los sitios reforestados.

Calendario de monitoreo		
Primer periodo Octubre 2023	Segundo monitoreo Enero 2024	Tercer monitoreo Abril 2024
Variables colectadas:	Variables colectadas:	Variables colectadas:
Conteo de plantas vivas. Altura. Diámetro basal.	Conteo de plantas vivas. Altura. Diámetro basal.	Conteo de plantas vivas. Altura. Diámetro basal.

7.3. Tercera etapa

Consistió la captura de todos los datos recabados en los monitoreos y se concentró en una base de datos de Excel® (ver. 16.0, 2024). Estos datos fueron utilizados para el posterior análisis estadístico de la información

La información recopilada en la base de datos se utilizó para obtener los datos de estadística descriptiva, con el objetivo de observar la tasa de supervivencia y las variables de crecimiento en las diferentes estrategias de reforestación establecidas. Para determinar las diferencias significativas entre las variables de los diferentes tratamientos, se realizaron análisis de varianza usando el procedimiento GLM (Modelo Lineal Generalizado) y el software estadístico SAS (SAS Institute Inc., 2021), así como los paquetes estadísticos "psych" v 2.4.6 y "ggplot2" 3.5.1. Un GLM es una extensión de los modelos lineales clásicos que permite modelar variables dependientes que no necesariamente siguen una distribución normal. En un GLM, la relación entre la variable dependiente y las variables independientes se establece a través de una función de enlace, lo que permite que el modelo se ajuste a diferentes tipos de distribuciones (Nelder y Wedderburn, 1972).

Este modelo fue elegido porque permite estudiar cómo ciertos resultados, como la supervivencia o el crecimiento, cambian según factores como la especie plantada y la densidad, adaptándose a diferentes tipos de variables y captando efectos complejos de cada estrategia de reforestación.

Se utilizaron los siguientes modelos estadísticos:

$$Y_{\{ij\}} = \mu + T_{\{i\}} + D_{\{j\}} + T_{\{i\}} * D_{\{j\}} + \varepsilon_{\{ij\}}$$

para cada uno de los sitios, donde Y_{ij} = variable de respuesta, μ = efecto de la media general, T_i = efecto de i -ésimo tratamiento, D_j =efecto de j -ésima densidad, T_i*D_j = ij -ésima interacción tratamiento*densidad, ε_{ij} = error.

$$Y_{\{ij\}} = \mu + E_{\{i\}} + D_{\{j\}} + E_{\{i\}} * D_{\{j\}} + \epsilon_{\{ij\}}$$

para cada uno de los sitios, donde Y_{ij} = variable de respuesta, μ = efecto de la media general, E_i = efecto de i -ésima especie, D_j = efecto de j -ésima densidad, E_i*D_j = ij -ésima interacción especie*densidad, ε_{ij} = error.

$$Y_{\{ij\}} = \mu + S_{\{i\}} + D_{\{j\}} + S_{\{i\}} * D_{\{j\}} + \epsilon_{\{ij\}}$$

para la especie *Fraxinus spp.*, donde Y_{ij} =variable de respuesta, μ = efecto de la media, S_i = efecto de i -ésimo sitio, D_j = efecto de j -ésima densidad, S_i*D_j = ij -ésima interacción sitio*densidad, ε_{ij} = error.

$$Y_{\{ij\}} = \mu + T_{\{i\}} + D_{\{j\}} + T_{\{i\}} * D_{\{j\}} + \epsilon_{\{ij\}}$$

para las especies *Prosopis laevigata* y *Pinus devoniana*, donde Y_{ij} = variable de respuesta, μ = efecto de la media, T_i = efecto de i -ésimo tratamiento, D_j = efecto de j -ésima densidad, T_i*D_j = ij -ésima interacción tratamiento*densidad, ε_{ij} = error.

8. Resultados y discusión

8.1. Actores clave

La implementación exitosa de diferentes estrategias de reforestación en los dos sitios de estudio fue posible gracias a la colaboración y el apoyo activo de diversos actores clave. En total, se realizaron ocho jornadas de reforestación entre junio y septiembre de 2023, en las que participaron aproximadamente 744 voluntarios de diversas comunidades. Esta participación comunitaria fue fundamental no solo para cubrir la mano de obra necesaria en las actividades de plantación, sino también para fomentar el sentido de responsabilidad ambiental en los habitantes de la región y fortalecer el vínculo con el entorno natural.

Los árboles plantados fueron suministrados por tres fuentes principales: el vivero de la Secretaría de Desarrollo Sustentable, el vivero del campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro y el vivero de la asociación civil Reforestando Ejidos México. La diversidad de fuentes de abastecimiento no solo permitió asegurar la cantidad necesaria de árboles, sino también la variedad de especies adecuadas a las condiciones ecológicas de cada sitio de estudio. La participación de estos viveros fue crucial, ya que cada institución contribuyó con su experiencia y recursos para promover la investigación en aras de buscar mejores resultados en los procesos de reforestación.

El compromiso colectivo permitió que el proyecto avanzara de manera organizada, efectiva y en consonancia con las necesidades ecológicas y sociales de la región. Esta participación, por lo tanto, no solo facilitó la implementación de las actividades de reforestación, sino que también contribuyó a la creación de una red de apoyo para la regeneración de los ecosistemas y el fortalecimiento del capital social en torno a la conservación ambiental.

8.2. Estadística descriptiva

Los datos obtenidos a lo largo del periodo de monitoreo muestran que la tasa de supervivencia en la microcuenca Ajuchitlancito es visualmente mayor, alcanzando un 89.8% de plantas vivas, con respecto al porcentaje de plantas vivas de la microcuenca

Ejido San Martín (43.1%) (Fig.12). La baja supervivencia en la microcuenca San Martín puede estar relacionada entre otras consideraciones con las condiciones de compactación y erosión del suelo.

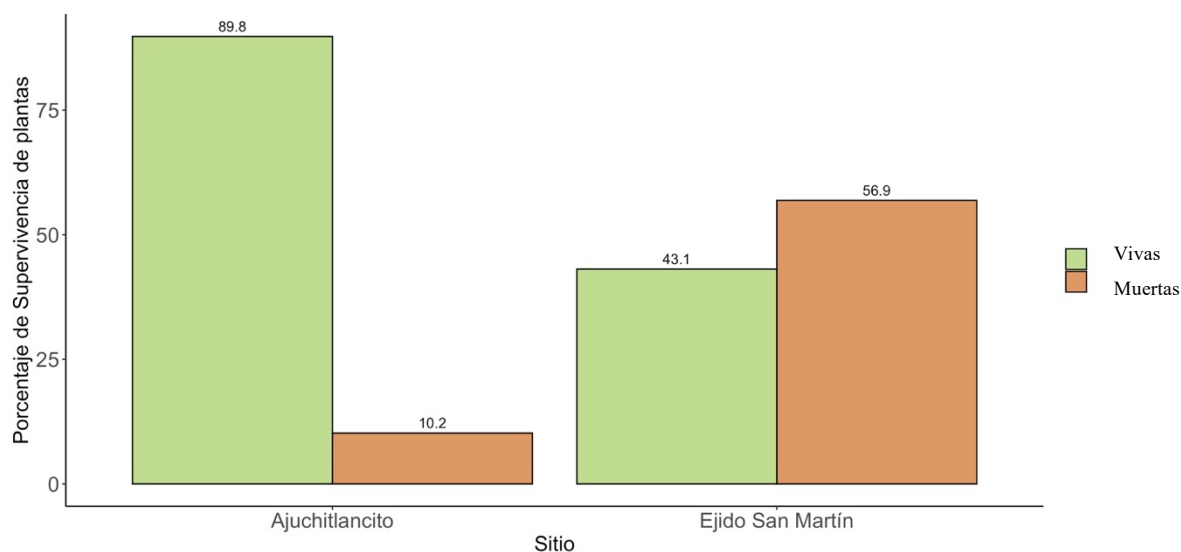


Figura 12. Porcentaje de supervivencia por sitios.

La significativa diferencia en las tasas de supervivencia entre los sitios de estudio en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín, ($P \leq 0.05$), puede atribuirse a las condiciones específicas de cada sitio de reforestación. En Ajuchitlancito, el tipo de suelo arcilloso tiene una alta capacidad de retención de humedad, lo que beneficia el desarrollo de los árboles, especialmente el de las especies resistentes a la sequía que se han plantado en esta área. Esta combinación de suelo adecuado y especies adaptadas pudo haber propiciado una alta tasa de supervivencia del 89.8%. Por otro lado, la microcuenca Ejido San Martín enfrenta características distintas. La presencia de erosión y compactación del suelo en esta área pudieron haber limitado el establecimiento y crecimiento de las raíces de los árboles, afectando negativamente su capacidad para absorber agua y nutrientes. La baja disponibilidad de agua en el suelo podría ser una limitante para el desempeño de los árboles como ocurre en la temporada de sequía, pues la falta de agua limita el crecimiento y la productividad de especies de pino (Flores y Allen, 2004). La disponibilidad de agua durante el primer año de establecimiento es el

factor principal responsable de la supervivencia y desarrollo de especies arbóreas usadas en reforestación (Sáenz y Lindig, 2004). Estos factores adversos son probablemente responsables de la baja tasa de supervivencia del 43.1% observada en este sitio, sin embargo, es pertinente mencionar que las tasas de supervivencia en ambos sitios son mayores a la tasa media reportada por la CONAFOR en el 2014 para el estado de Querétaro, que fue del 30.9% (Vanegas, 2016).

Por otro lado, la altura promedio de los árboles nos revelan que en la microcuenca Ajuchitlancito la altura promedio de los árboles de 30.99 cm, mientras que, en la microcuenca Ejido San Martín la altura promedio registrada es de 10.49 cm (Fig. 13).

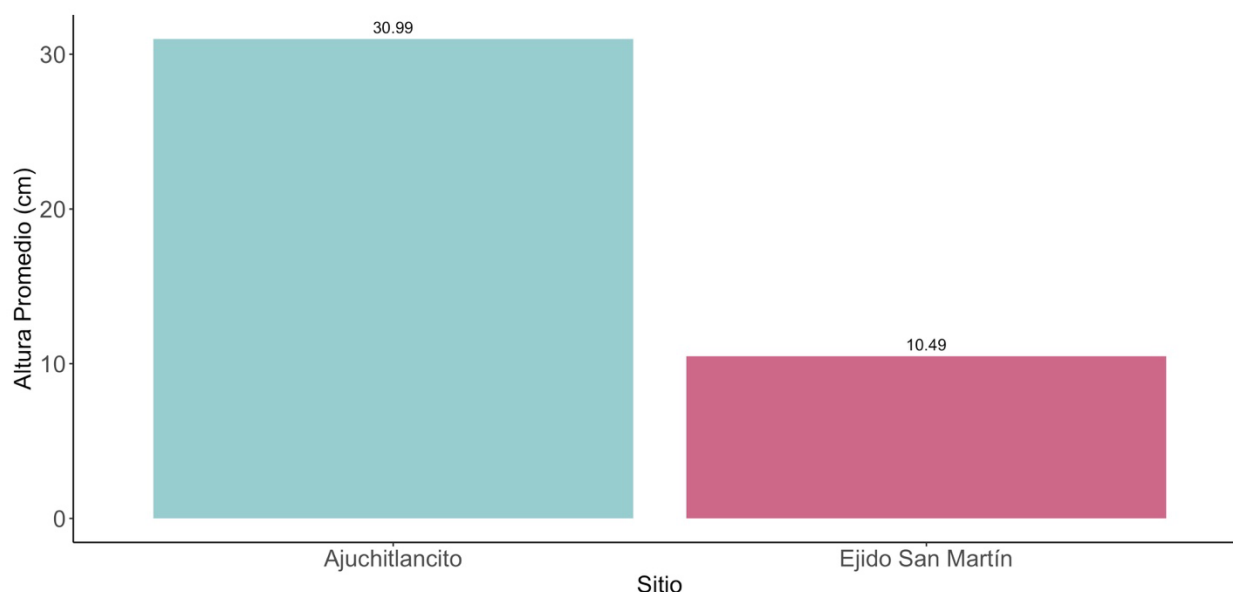


Figura 13. Altura promedio por sitio.

Esta diferencia puede explicarse en parte porque los árboles plantados inicialmente en el sitio de reforestación en la microcuenca Ajuchitlancito eran, en promedio, un poco más altos que los plantados en el sitio de estudio de la microcuenca Ejido San Martín. En la microcuenca Ajuchitlancito, aunque los árboles eran ligeramente más altos inicialmente, varios factores pudieron haber influido en su crecimiento. Algunas ramas principales se secaron afectando su altura, sin embargo, otras ramas han rebrotado y crecieron. Además, en una ocasión se registró el daño por ingreso de ganado bovino al área, lastimando algunos fresnos y causando una reducción adicional en la altura de los

árboles. En ambos sitios la presencia de animales como roedores y ardillas que buscan alimento pudo haber contribuido a la reducción de la altura al morder los árboles, situación también reportada en por Hernández, L. (2010). Este tipo de daño es común en áreas de reforestación y puede tener un impacto significativo en el crecimiento de los árboles. En el Ejido San Martín, las condiciones adversas del suelo y el estrés hídrico pudieron haber provocado que los fresnos experimentaran un estrés considerable. Como resultado, algunas de sus ramas se secaron, y aunque los árboles están comenzando a rebrotar, su altura ha disminuido en muchos casos en lugar de aumentar. Este rebrote indica que los árboles están vivos, pero las condiciones han limitado su crecimiento vertical.

Por otro lado, se presenta el diámetro basal promedio de los árboles plantados en las dos microcuencas después del tercer monitoreo (Fig.14). En la microcuenca Ajuchitlancito, el diámetro basal promedio de los árboles es de 68.55 mm. Por otro lado, en la microcuenca Ejido San Martín, el diámetro basal promedio registrado es de 27.48 mm.

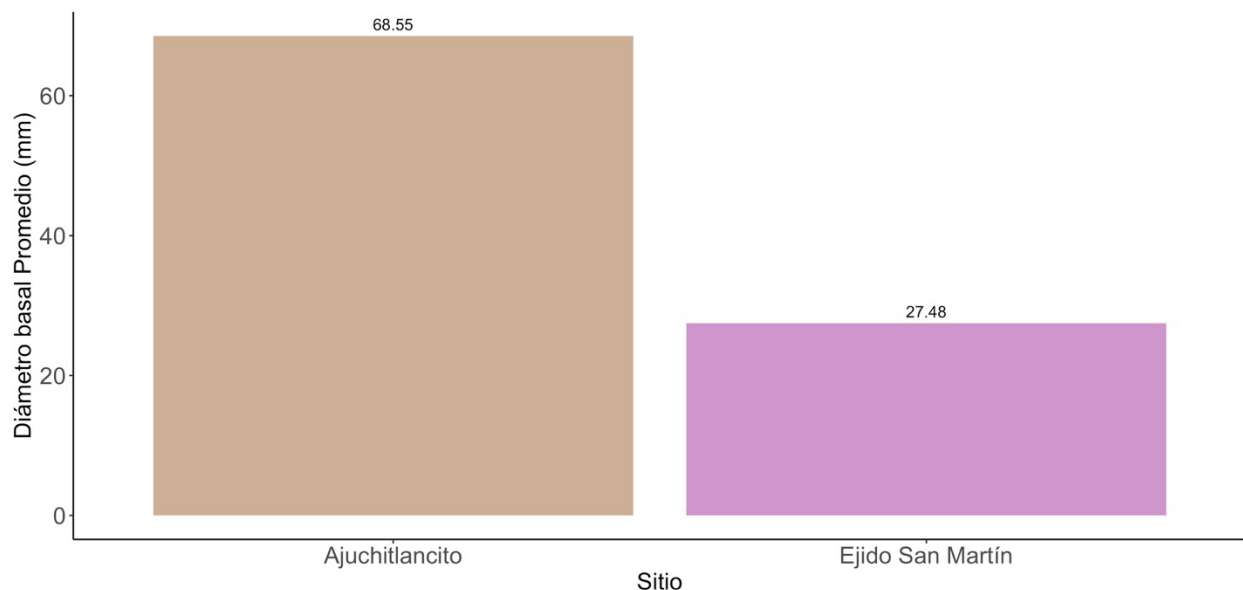


Figura 14. Diámetro basal promedio por sitios.

En cada uno de los sitios de reforestación se plantaron especies diferentes, por lo que la comparación directa entre los diámetros basales promedio de ambos sitios no es relevante. Sin embargo, los factores específicos que podrían haber influido en el desarrollo de los árboles incluyen el tipo de suelo, la precipitación durante el período de estudio, y las condiciones de erosión y compactación del suelo. Estos factores pudieron haberse reflejado en el diámetro basal de los árboles.

Estos resultados subrayan la necesidad de adoptar un enfoque integral que considere las características edáficas, climáticas y ecológicas en el diseño y monitoreo de programas de reforestación, así como la importancia de implementar acciones de manejo adaptativo que incluyan obras de conservación de suelo y agua para mejorar las condiciones de los sitios más degradados. Las estrategias de reforestación deben ajustarse a las condiciones locales para maximizar el éxito y garantizar la sostenibilidad de las áreas reforestadas.

8.3 Análisis estadístico

El análisis GLM (Modelo Lineal Generalizado) de la supervivencia, altura y diámetro basal (Tabla 2) de las especies de árboles plantados en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín, en el estado de Querétaro, nueve meses después de la plantación. La tabla se divide en dos secciones principales: la primera sección proporciona datos sobre densidad, tratamiento e interacción tratamiento por densidad para cada una de las microcuencas, Ajuchitlancito y Ejido San Martín. Para cada microcuenca, se incluyen las variables densidad, tratamiento e interacción tratamiento por densidad, junto con los grados de libertad y la significancia para cada variable respecto a las tasas de supervivencia, la altura y el diámetro basal de los árboles. La segunda sección de la tabla considera las variables especie, densidad e interacción especie por densidad, también organizadas por microcuenca. De igual manera, en esta sección, se presentan los grados de libertad y la significancia para cada variable en relación con las tasas de supervivencia, la altura y el diámetro basal de los árboles.

Tabla 2. Análisis GLM para la supervivencia, altura y diámetro de las especies de árboles plantados en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín, en el estado de Querétaro a 9 meses de la plantación.

Microcuenca		% Supervivencia		Altura (cm)		Diámetro basal (mm)	
		g.l.	P	g.l.	P	g.l.	P
Ajuchitlancito	Tratamiento	1	<.0001	1	<.0001	1	<.0001
	Densidad	2	0.6380	2	0.4691	2	<.0001
	Trat*Den	2	0.0431	2	<.0001	2	<.0001
San Martín	Tratamiento	1	<.0001	1	<.0001	1	<.0001
	Densidad	2	0.3120	2	0.2367	2	0.1111
	Trat*Den	2	<.0001	2	0.0229	2	0.0346
Ajuchitlancito	Especie	3	0.3150	3	0.0533	3	0.0053
	Densidad	1	0.2050	1	0.4691	1	<.0001
	Esp*Den	3	0.0407	3	<.0001	3	<.0001
San Martín	Especie	2	0.0004	2	0.0002	2	<.0001
	Densidad	1	0.4205	1	0.4542	1	<.0001
	Esp*Den	2	0.5107	2	0.0092	2	<.0001

g.l.= grados de libertad, $p < .05$; Trat*Dens: Tratamiento-Densidad; Esp*Den: Especie-Densidad.

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre los tratamientos en el sitio de reforestación de la microcuenca Ajuchitlancito. Para la supervivencia, se observaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.0001$), lo que sugiere que los diferentes tratamientos influyen considerablemente en la tasa de supervivencia de los árboles, siendo la plantación monoespecífica el tratamiento con mayor tasa de supervivencia (Fig. 15). La supervivencia de las plantas en un determinado sitio puede ser afectada por las propiedades fisicoquímicas del suelo como: humedad, temperatura, pH, conductividad eléctrica y contenido de nutrientes (Omary, 2011); aunadas a las condiciones del suelo.

De manera similar, se encontraron diferencias significativas en la altura de las plantas ($P \leq 0.0001$) y en el diámetro basal ($P \leq 0.0001$) entre los tratamientos, indicando

una mayor altura y diámetro basal en los ensambles (Fig. 16 y 17). Estas diferencias sugieren que los tratamientos aplicados tienen un impacto considerable en el desarrollo y la supervivencia de las plantas en este sitio de reforestación.

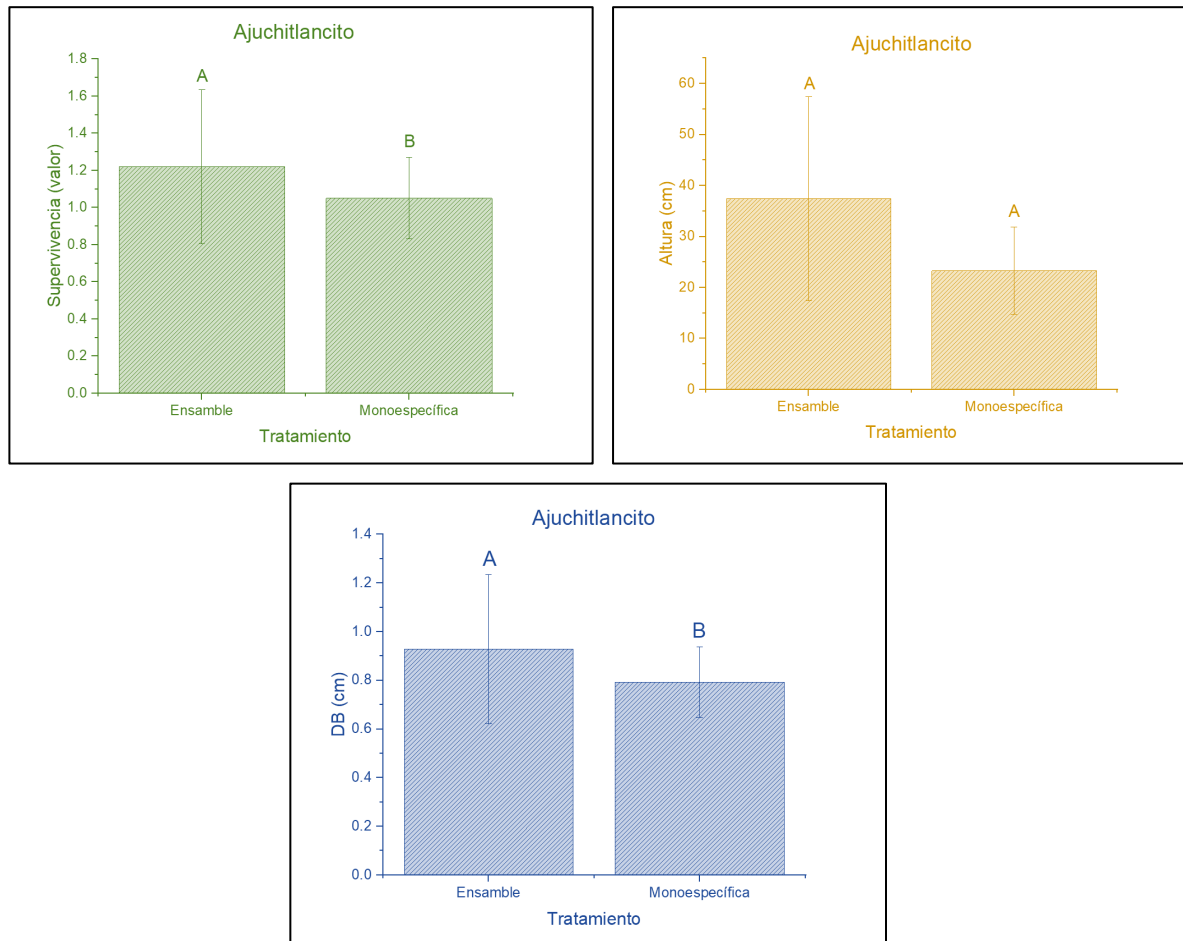


Figura 15. Supervivencia, Altura y Diámetro basal por tratamiento en Ajuchitlancito.

Para la microcuenca San Martín, el análisis de varianza reveló diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos aplicados en el sitio de reforestación. La supervivencia de las plantas mostró una diferencia altamente significativa entre los tratamientos ($P \leq 0.0001$), siendo el ensamble el tratamiento con mayor tasa de supervivencia (Fig. 16). De la misma forma, se observaron diferencias altamente significativas en la altura de las plantas ($P \leq 0.0001$) y en el diámetro basal ($P \leq 0.0001$) entre los diferentes tratamientos, siendo la plantación monoespecífica el tratamiento con mayor altura y diámetro basal en los árboles plantados (Fig. 16). Estos

resultados indican que los tratamientos aplicados en la microcuenca Ejido San Martín influyen significativamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas reforestadas. La variabilidad en estos parámetros podría estar relacionada con factores como la competencia con entre especies y las condiciones ambientales específicas del sitio.

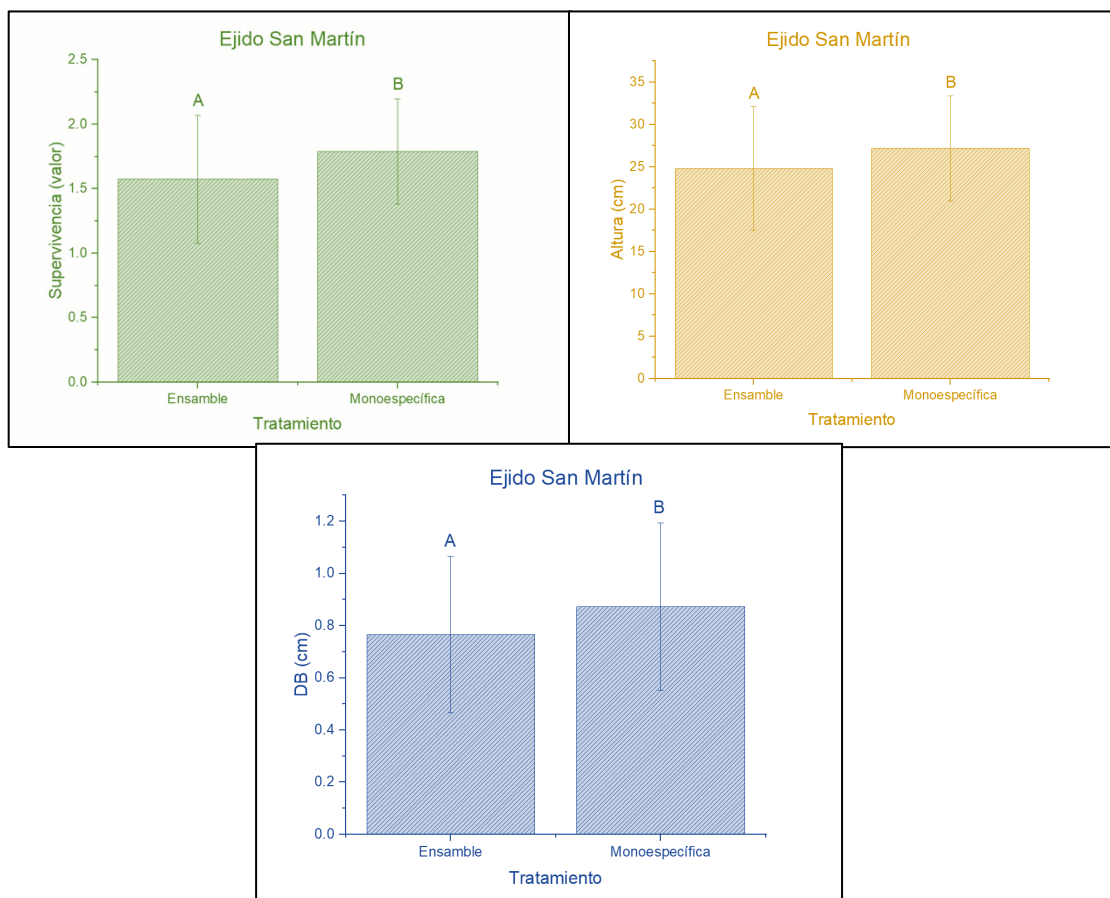


Figura 16. Supervivencia, Altura y Diámetro basal por tratamiento en Ejido San Martín.

El análisis de varianza también muestra diferencias altamente significativas en el diámetro basal ($P \leq 0.0001$) entre densidades en la microcuenca Ajuchitlancito, siendo en las densidades de plantación media (2.5 m) y baja (3 m) en donde se registra el diámetro basal de los árboles más alto (Fig. 17). Esto indica que la densidad de plantación influye en el grosor de la base de las plantas. Este resultado sugiere que las plantas tienen diferentes respuestas en su crecimiento estructural dependiendo de la densidad a la que son reforestadas, posiblemente debido a factores como la competencia por recursos y el espacio disponible. Sin embargo, para la supervivencia de las plantas no se encontraron diferencias significativas entre las diferentes densidades ($P = 0.6380$).

Esto indica que, en términos de supervivencia, la densidad de plantación no afecta significativamente la capacidad de las plantas para sobrevivir en este sitio específico. Esto podría estar relacionado con factores ambientales locales que permiten una tasa de supervivencia constante, independientemente de la densidad. Asimismo, en cuanto a la altura de las plantas, no se detectaron diferencias significativas entre las diferentes densidades ($P = 0.4691$). Este resultado sugiere que la altura de las plantas no se ve significativamente influenciada por la densidad de plantación en la microcuenca Ajuchitlancito, lo cual podría deberse a una uniformidad en las condiciones de crecimiento, como la disponibilidad de luz, agua y nutrientes. Por otro lado, es posible que la muerte de ramas principales en algunos árboles, seguida por el rebrote, haya afectado la altura sin comprometer la supervivencia de las plantas, lo que coincide con lo reportado por (Hernández, 2010).

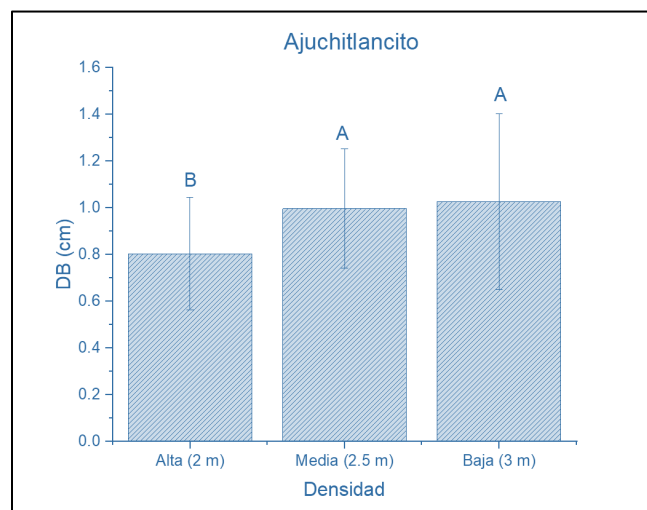


Figura 17. Diámetro basal por densidad en Ajuchitlancito.

En la microcuenca San Martín el análisis de varianza no mostró diferencias significativas entre las diferentes densidades para ninguna de las variables medidas en el sitio de reforestación. En cuanto a la supervivencia de las plantas, no se encontraron diferencias significativas ($P=0.3120$), lo que sugiere que la densidad de plantación no afecta de manera importante la capacidad de las plantas para sobrevivir en este sitio específico. Asimismo, la altura de las plantas tampoco presentó diferencias significativas

entre las diferentes densidades ($P = 0.2367$). Esto sugiere que la altura de las plantas no se ve influenciada por la densidad de plantación en esta microcuenca, posiblemente debido a una uniformidad en las condiciones ambientales, como la disponibilidad de luz y nutrientes. Finalmente, el diámetro basal de las plantas tampoco mostró diferencias significativas entre las distintas densidades de plantación ($P = 0.1111$). Este resultado indica que la densidad de plantación no tiene un efecto significativo en el grosor de la base de las plantas.

El análisis de varianza muestra diferencias significativas en la interacción tratamiento*densidad en el sitio de reforestación de la microcuenca Ajuchitlancito. La supervivencia de las plantas presentó diferencias significativas ($P = 0.0431$), lo que indica que la combinación específica de tratamiento y densidad influye de manera importante en la capacidad de las plantas para sobrevivir. Esto sugiere que ciertos tratamientos pueden ser más efectivos en ciertas densidades, optimizando así las tasas de supervivencia en la reforestación. En cuanto a la altura de las plantas, se encontraron diferencias altamente significativas en la interacción tratamiento*densidad ($P \leq 0.0001$).

Lo anterior implica que la altura de las plantas está considerablemente influenciada por la combinación de tratamiento aplicado y la densidad de plantación. Las variaciones en la altura pueden reflejar cómo diferentes tratamientos afectan el crecimiento vertical de las plantas bajo distintas condiciones de densidad. De manera similar, el diámetro basal de las plantas también mostró diferencias altamente significativas en la interacción (tratamiento*densidad) ($P \leq 0.0001$). Esto indica que el grosor de la base de las plantas varía notablemente según la combinación de tratamiento y densidad. Estos resultados sugieren que ciertos tratamientos pueden promover un mayor crecimiento en diámetro basal en determinadas densidades de plantación, lo cual es importante para la estabilidad y robustez de las plantas.

Para la interacción (tratamiento*densidad) en la microcuenca Ejido San Martín, el análisis de varianza mostró diferencias significativas. En cuanto a la supervivencia de las plantas, se encontraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.0001$), lo que indica que la combinación específica de tratamiento y densidad tiene un impacto considerable en la capacidad de las plantas para sobrevivir. Este resultado sugiere que ciertos

tratamientos son más efectivos en ciertas densidades, optimizando así las tasas de supervivencia en la reforestación.

Con respecto a la altura de las plantas mostró diferencias significativas en la interacción tratamiento*densidad ($P = 0.0229$). Esto quiere decir que la altura de las plantas está significativamente influenciada por la combinación de tratamiento aplicado y la densidad de plantación. De manera similar, el diámetro basal de las plantas también presentó diferencias significativas en la interacción (tratamiento*densidad) ($P = 0.0346$). Este resultado indica que el grosor de la base de las plantas varía según la combinación de tratamiento y densidad. Estas diferencias en la altura y el diámetro basal sugieren que ciertos tratamientos pueden promover un mayor crecimiento en altura y diámetro basal en determinadas densidades de plantación.

En cuanto a las diferencias significativas entre especies, en la microcuenca Ajuchitlancito el análisis de varianza nos muestra que hay diferencias significativas en el diámetro basal ($P = 0.0053$), siendo *Fraxinus spp.* y *Eysenhardtia polystachya* las especies con mayor diámetro basal (Fig.18). Esto sugiere que ciertas especies pueden tener una ventaja competitiva en términos de crecimiento estructural. Por otro lado, la altura de las plantas no mostró diferencias significativas entre las especies ($P = 0.0533$), aunque este valor está cerca del umbral de significancia. Esto sugiere que, aunque las especies no difieren significativamente en altura, puede haber tendencias que indiquen una ligera variación en cómo diferentes especies responden al entorno en términos de crecimiento vertical. Esta posible variación podría estar relacionada con factores como la competencia por luz o la adaptación a las condiciones del suelo y clima del sitio.

En cuanto a la supervivencia, no se determinaron diferencias significativas entre las especies ($P = 0.3150$). Este resultado indica que todas las especies plantadas tienen una capacidad de supervivencia similar en el sitio de reforestación de la microcuenca Ajuchitlancito. La poca variación en la supervivencia sugiere que las condiciones del sitio son adecuadas para el establecimiento inicial de una variedad de especies, lo que puede ser beneficioso para la diversidad ecológica de la zona.

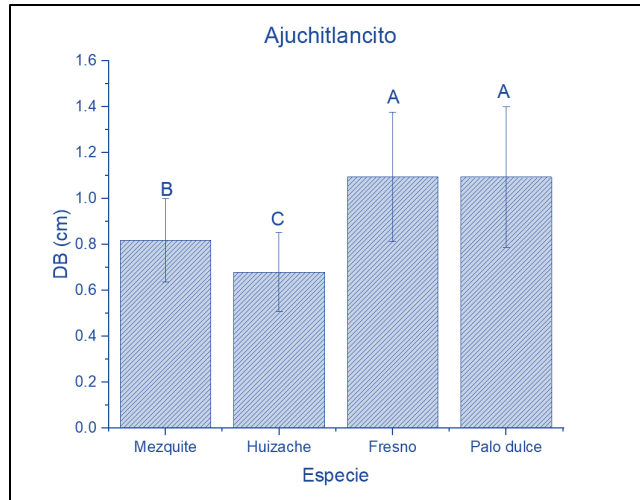


Figura 18. Diámetro basal por especie en Ajuchitlancito.

En contraste, en la microcuenca Ejido San Martín, el análisis de varianza mostró diferencias significativas entre especies en el sitio de reforestación. En cuanto a la supervivencia, se encontraron diferencias altamente significativas ($P = 0.0004$), siendo *Fraxinus spp.* la especie con mayor tasa de supervivencia (Fig. 19) y *Pinus pseudostrobus* mostró la menor supervivencia lo cual coincide con lo reportado por Blanco-García *et al.* (2012). Este resultado sugiere *Fraxinus spp.* pudiera adaptarse mejor a las condiciones ambientales de la microcuenca. También, se observaron diferencias significativas en la altura ($P=0.0002$) y diámetro basal ($P \leq 0.0001$) de las plantas entre las especies siendo *Pinus devoniana* la especie con mayor altura promedio y diámetro basal promedio (Fig. 19). Este resultado podría estar relacionado con factores específicos de cada especie, como su tasa de crecimiento y su respuesta a la disponibilidad de recursos como luz, humedad y nutrientes, así como su resistencia a condiciones adversas.

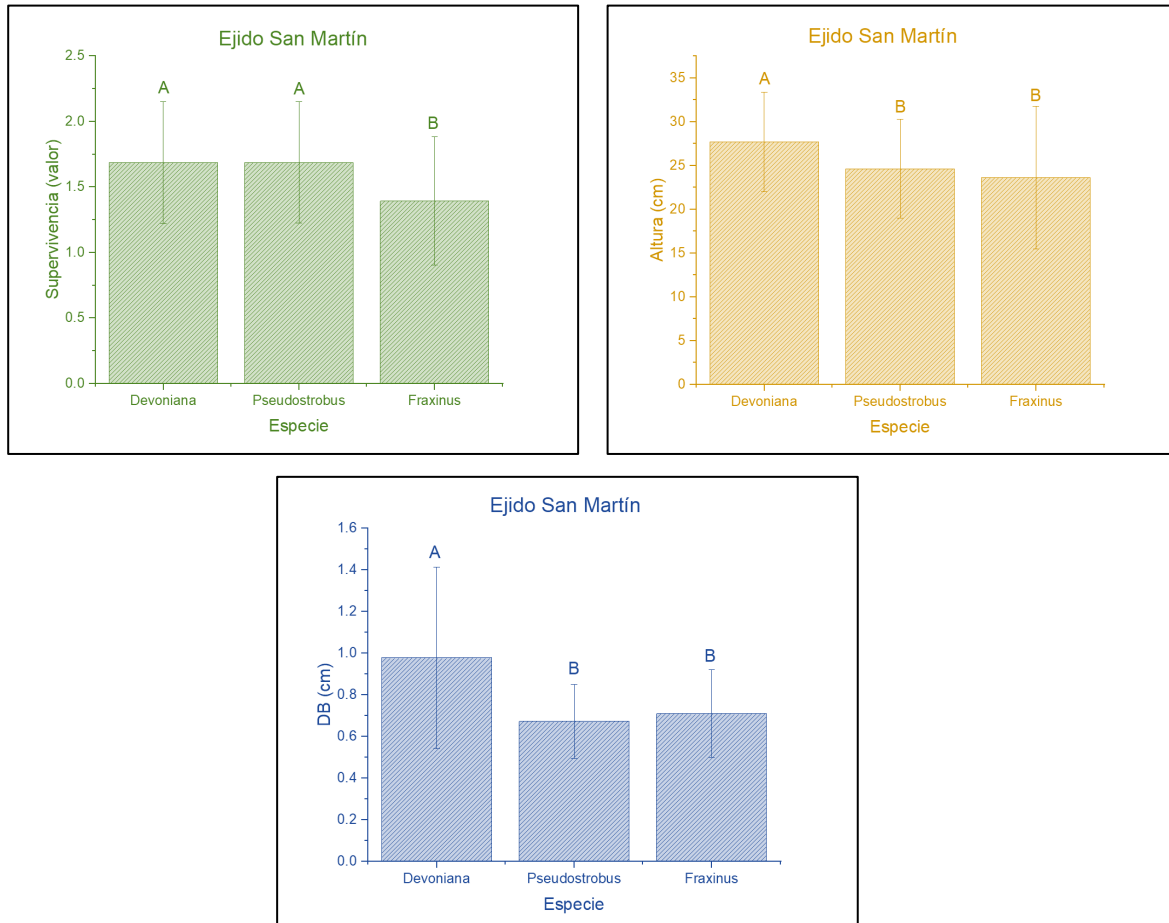


Figura 19. Supervivencia, Altura y Diámetro basal.

Para la interacción especie*densidad en el sitio de reforestación de la microcuenca Ajuchitlancito, análisis de varianza mostró diferencias significativas. En cuanto a la supervivencia de las plantas, se encontraron diferencias significativas ($P=0.0407$). Este resultado sugiere que ciertas especies tienen mejores tasas de supervivencia a determinadas densidades de plantación, lo que es crucial para la planificación de reforestaciones efectivas. Asimismo, la altura de las plantas mostró diferencias altamente significativas en la interacción especie*densidad ($P \leq 0.0001$). Esto implica que la altura de las plantas está significativamente influenciada por la combinación de especie y densidad de plantación. Las variaciones en la altura pueden reflejar cómo diferentes especies responden a la competencia por recursos como la luz, la humedad y los

nutrientes a distintas densidades de plantación. De manera similar, el diámetro basal de las plantas también presentó diferencias altamente significativas en la interacción especie*densidad ($P \leq 0.0001$). Este resultado indica que el grosor de la base de las plantas varía notablemente según la combinación de especie y densidad.

En la microcuenca Ejido San Martín, el análisis de varianza mostró diferencias significativas en la interacción (especie*densidad). En la supervivencia de las plantas, no se encontraron diferencias significativas ($P=0.5107$), lo que indica que la combinación específica de especie y densidad de plantación no tiene un impacto considerable en la capacidad de las plantas para sobrevivir. Este resultado sugiere que, en términos de supervivencia, las especies plantadas pueden adaptarse de manera similar a distintas densidades de plantación en este sitio específico. Sin embargo, la altura de las plantas ($P=0.0092$) y el diámetro basal ($P \leq 0.0001$) mostraron diferencias significativas en la interacción (especie*densidad). Esto indica que estas variables están significativamente influenciadas por la combinación de especie y densidad de plantación. Estas variaciones pueden reflejar cómo diferentes especies responden a la competencia por recursos como la luz, la humedad y los nutrientes en distintas densidades de plantación, lo que afecta su crecimiento y adaptación al ambiente.

El análisis GLM (Modelo Lineal Generalizado) de la supervivencia, altura y diámetro basal de la especie *Fraxinus spp.* plantada en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín (Tabla 4), en el estado de Querétaro, 9 meses después de la plantación. La tabla contiene los datos de sitio, densidad e interacción sitio por densidad para las variables de supervivencia, altura y diámetro basal. Para cada variable, se muestran los grados de libertad y la significancia, proporcionando información detallada de cómo estos factores afectan el desarrollo de la especie *Fraxinus spp.* en ambas microcuencas.

Tabla 3. Análisis GLM para la supervivencia, altura y diámetro de la especie *Fraxinus* spp. plantada en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín, en el estado de Querétaro a 9 meses de la plantación.

Especie		% Supervivencia		Altura (cm)		Diámetro basal (cm)	
		g.l.	P	g.l.	P	g.l.	P
<i>Fraxinus</i> <i>spp.</i>	Sitio	1	0.0140	1	<.0001	1	<.0001
	Densidad	2	0.7032	2	0.8533	2	<.0001
	Sitio*Den	2	0.6500	2	0.1787	2	<.0001

g.l.= grados de libertad, $p \leq .05$

El análisis de varianza muestra diferencias significativas entre los sitios de reforestación en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín para la especie *Fraxinus* spp. En cuanto a la supervivencia de las plantas, se encontraron diferencias significativas entre los dos sitios ($P = 0.0140$), siendo Ajuchitlancito el sitio con mayor tasa de supervivencia de esta especie (Fig.20). Esto podría indicar que las condiciones ambientales y de manejo en cada microcuenca influyen de manera importante en la capacidad de supervivencia de *Fraxinus* spp. Este resultado sugiere que algunos factores específicos de cada sitio, como las características del suelo y la disponibilidad de agua pueden estar afectando la supervivencia de las plantas. Además, la altura de las plantas ($P \leq 0.0001$) y el diámetro basal ($P \leq 0.0001$) presentaron diferencias altamente significativas entre los sitios, siendo Ajuchitlancito el sitio con mayor altura promedio y diámetro basal promedio en los árboles en la especie *Fraxinus* spp. (Fig. 20). Esto podría estar relacionado con variaciones en la disponibilidad de recursos como la luz, la humedad y los nutrientes, así como con las prácticas de manejo forestal aplicadas en cada sitio.

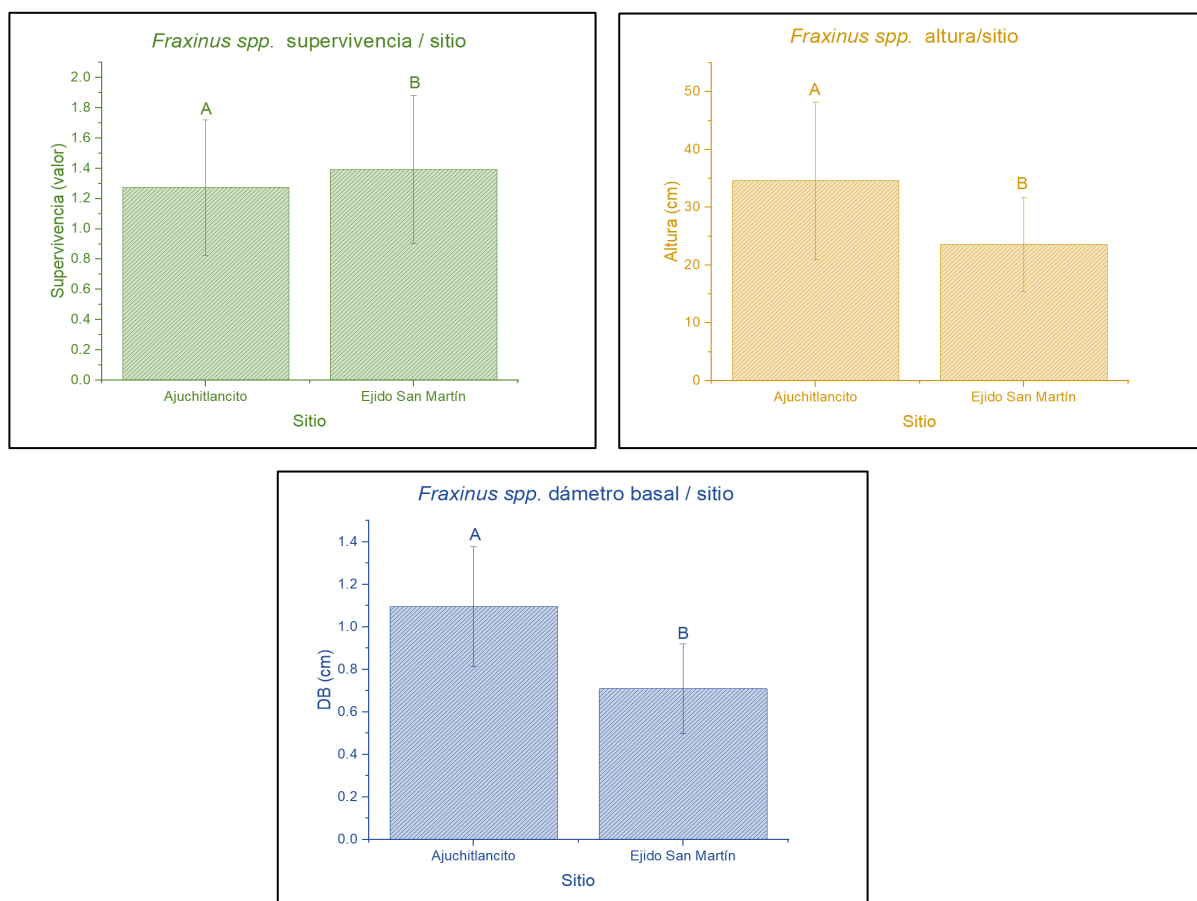


Figura 20. Supervivencia, Altura y Diámetro basal de *Fraxinus spp.*

Entre las densidades de plantación alta (2 m), media (2.5 m) y baja (3 m) para la especie *Fraxinus spp.* el análisis de varianza mostró que, en la supervivencia de las plantas, no se encontraron diferencias significativas entre las distintas densidades de plantación ($P = 0.7032$), lo que indica que la densidad de plantación no tiene un impacto considerable en la capacidad de supervivencia de *Fraxinus spp.* Esto sugiere que, independientemente de la densidad de plantación, las plantas tienen una capacidad de supervivencia similar, lo cual podría estar relacionado con la adaptabilidad de la especie a diferentes condiciones de competencia por recursos.

Asimismo, la altura de las plantas tampoco mostró diferencias significativas entre las distintas densidades de plantación ($P = 0.8533$). Esto significa que la densidad de plantación no afecta significativamente el crecimiento vertical de *Fraxinus spp.* La uniformidad en la altura de las plantas podría deberse a una similar disponibilidad de

recursos en todas las densidades, o a la capacidad de las plantas para adaptarse a la competencia en distintas condiciones de plantación. Sin embargo, el diámetro basal de las plantas sí presentó diferencias altamente significativas entre las densidades de plantación ($P \leq 0.0001$) siendo la densidad media baja (3 m) la de mayor diámetro basal promedio de las plantas (Fig. 21). Este resultado nos dice que el grosor de la base de los tallos de *Fraxinus spp.* varía considerablemente según la densidad de plantación. Las plantas en densidades más bajas pueden haber tenido acceso a más recursos, lo que les permitió desarrollar un mayor diámetro basal en comparación con las plantas en densidades más altas, donde la competencia por recursos es mayor.

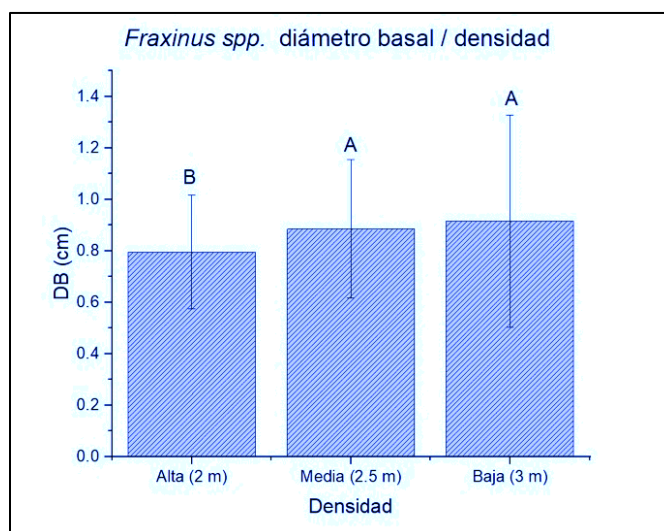


Figura 21. Diámetro basal por densidad de la especie *Fraxinus spp.* Elaboración propia, 2024.

En la interacción sitio por densidad para la especie *Fraxinus spp.* en los sitios de estudio, el análisis de varianza mostró que en la supervivencia de las plantas no se encontraron diferencias significativas ($P = 0.6500$), lo que indica que la combinación de sitio y densidad de plantación no afecta de manera notable la capacidad de supervivencia de esta especie. Este resultado sugiere que la especie puede adaptarse a diferentes densidades de plantación de manera similar en ambos sitios. Asimismo, la altura de las plantas tampoco mostró diferencias significativas en la interacción sitio*densidad ($P = 0.1787$). Esto quiere decir que la combinación de sitio y densidad de plantación no tiene

un efecto significativo sobre el crecimiento vertical de *Fraxinus spp.* La similitud en la altura de las plantas entre los diferentes sitios y densidades puede deberse a una equitativa disponibilidad de recursos, o a una respuesta adaptativa similar de la especie en diferentes condiciones de competencia. Sin embargo, el diámetro basal de las plantas presentó diferencias altamente significativas en la interacción sitio*densidad ($P \leq 0.0001$). Este resultado indica que el grosor de la base de los tallos de *Fraxinus spp.* varía considerablemente según la combinación de sitio y densidad de plantación. Las diferencias observadas pueden estar relacionadas con las variaciones en las condiciones del suelo y ambientales entre los sitios, así como con el grado de competencia por recursos en las diferentes densidades de plantación. Es posible que, en ciertos sitios, las plantas en densidades más bajas hayan tenido acceso a más recursos, permitiendo un mayor desarrollo del diámetro basal en comparación con las plantas en densidades más altas.

Tabla 4. Análisis GLM para la supervivencia, altura y diámetro de las especies *Prosopis laevigata* y *Pinus devoniana* plantadas en las microcuencas Ajuchitlancito y Ejido San Martín respectivamente, en el estado de Querétaro a 9 meses de la plantación.

		% Supervivencia		Altura (cm)		Diámetro basal (cm)	
		g.l.	P	g.l.	P	g.l.	P
<i>Prosopis laevigata</i>	Tratamiento	1	<.0001	1	0.0112	1	0.0805
	Densidad	2	0.3331	2	0.0001	2	0.0094
	Trat*Den	2	0.4002	2	0.0060	2	0.0582
<i>Pinus devoniana</i>	Tratamiento	1	<.0001	1	0.7561	1	0.0117
	Densidad	2	0.0008	2	0.0015	2	<.0001
	Trat*Den	2	0.0932	2	0.1204	2	0.0017

g.l.= grados de libertad, $p < .05$

El análisis de varianza muestra diferencias significativas entre los tratamientos para la especie *Prosopis laevigata*. En cuanto a la supervivencia de las plantas, se encontraron diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($P \leq 0.0001$), siendo la plantación monoespecífica el tratamiento con la mayor tasa de supervivencia

en esta especie (Fig. 22). Esto sugiere que ciertas condiciones de manejo o técnicas específicas pueden mejorar significativamente la supervivencia de esta especie, lo cual es crucial para el éxito de los proyectos de reforestación. Por otro lado, la altura de las plantas también presentó diferencias significativas entre los tratamientos ($P = 0.0112$), siendo la plantación monoespecífica el tratamiento con mayor diámetro basal promedio en lo árboles (Fig. 22). Este resultado indica que los distintos tratamientos afectan significativamente el crecimiento vertical de *Prosopis laevigata*. Las variaciones en la altura pueden reflejar cómo los diferentes tratamientos influyen en la disponibilidad de recursos, afectando así el desarrollo en altura de las plantas. Finalmente, el diámetro basal de las plantas no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($P = 0.0805$). Aunque no se alcanzó el umbral de significancia estadística ($P \leq 0.05$), la variación observada en el diámetro basal sugiere una tendencia que podría ser relevante en estudios futuros con un mayor tamaño de muestra o una duración de seguimiento más prolongada.

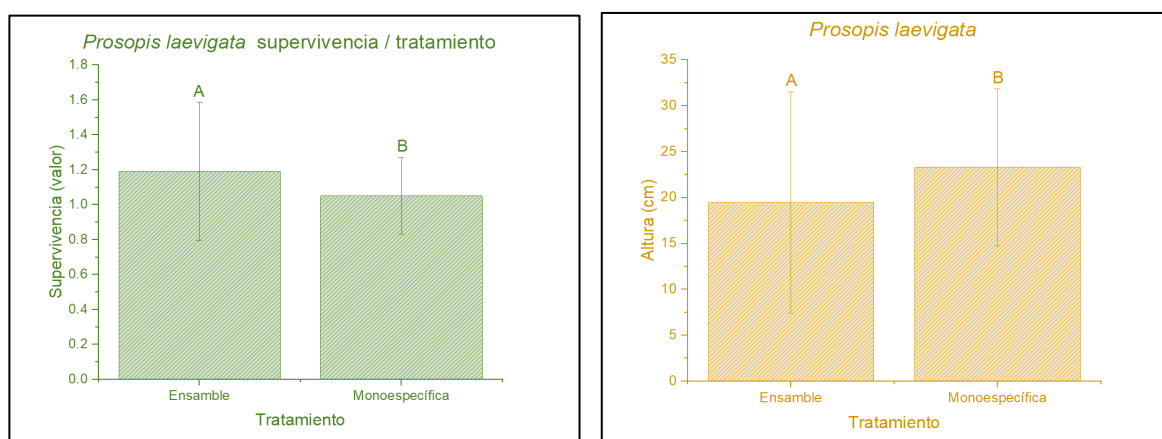


Figura 22. Supervivencia por tratamiento de la especie *Prosopis laevigata*.

Entre densidades de plantación para la especie *Prosopis laevigata*, el análisis de varianza mostró que en la supervivencia de las plantas no se encontraron diferencias significativas ($P = 0.3331$), lo que indica que la densidad de plantación no tiene un impacto considerable en la capacidad de supervivencia de esta especie. Este resultado

sugiere que, independientemente de la densidad de plantación, las plantas tienen una capacidad de supervivencia similar, lo cual podría estar relacionado con la adaptabilidad de la especie a diferentes condiciones de competencia por recursos. Sin embargo, la altura de las plantas presentó diferencias altamente significativas entre las distintas densidades de plantación ($P = 0.0001$) siendo la densidad de plantación alta (2 m) en donde se encuentran las mayores alturas de los árboles (Fig.23). De manera similar, el diámetro basal de las plantas también mostró diferencias significativas entre las densidades de plantación ($P = 0.0094$) de esta especie, siendo la densidad de plantación media (2.5 m) en donde está el diámetro basal promedio más alto (Fig. 23). Estos resultados indican que la densidad de plantación afecta significativamente el crecimiento vertical y el diámetro basal de *Prosopis laevis*. Estas variaciones pueden reflejar cómo diferentes densidades de plantación influyen en la competencia por recursos esenciales, afectando el desarrollo de las plantas. Es posible que las densidades más bajas, donde la competencia por recursos es menor, las plantas puedan crecer más.

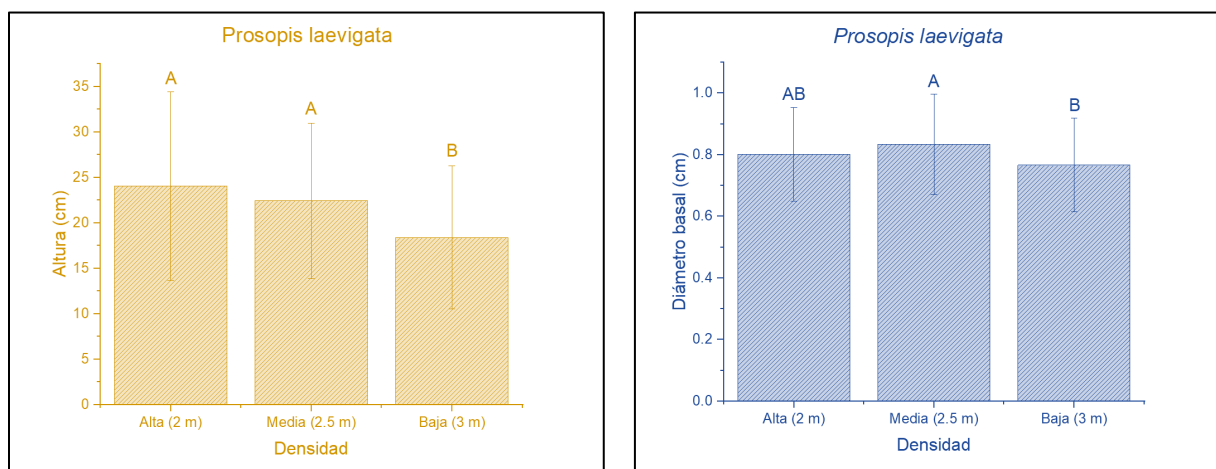


Figura 23. Altura y Diámetro basal por densidad.

En la interacción tratamiento por densidad para la especie *Prosopis laevis* en el sitio de reforestación de la microcuenca Ajuchitlancito el análisis de varianza mostró que en la supervivencia de las plantas no se encontraron diferencias significativas en la interacción tratamiento densidad ($P = 0.4002$), lo que indica que la combinación de los distintos tratamientos aplicados y las diferentes densidades de plantación no tiene un impacto considerable en la capacidad de supervivencia de esta especie. Este resultado

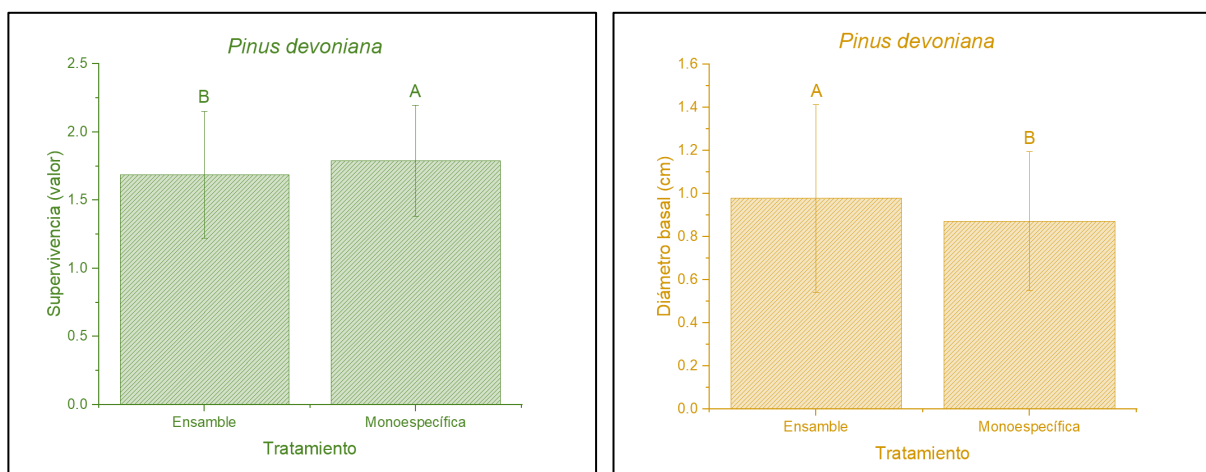
sugiere que, independientemente del tratamiento aplicado y la densidad de plantación, las plantas de *Prosopis* tienen una capacidad de supervivencia similar en este sitio de reforestación, reflejando una alta adaptabilidad a las condiciones ambientales y de manejo en este sitio de estudio. Sin embargo, la altura de las plantas sí presentó diferencias significativas en la interacción tratamiento*densidad ($P = 0.0060$). Este resultado indica que los distintos tratamientos afectan de manera significativa el crecimiento vertical de *Prosopis* dependiendo de la densidad de plantación. Por otro lado, el diámetro basal de las plantas no mostró diferencias significativas en la interacción tratamiento*densidad ($P = 0.0582$). Aunque no se alcanzó el umbral de significancia estadística ($P \leq 0.05$), la variación observada en el diámetro basal sugiere una tendencia que podría ser relevante en el futuro con un mayor tamaño de muestra o una duración de seguimiento más prolongada.

Entre los tratamientos aplicados en la reforestación con la especie *Pinus devoniana* en la microcuenca Ejido San Martín el análisis de varianza reveló que, en la supervivencia de las plantas, se observaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.0001$) siendo el ensamble el tratamiento en el que se presentó la mayor tasa de supervivencia (Fig. 24). Esto sugiere que los diferentes tratamientos aplicados tienen un impacto significativo en la capacidad de supervivencia de esta especie en esta área de reforestación. La alta significancia estadística refleja la importancia de seleccionar y aplicar tratamientos adecuados para garantizar el éxito de la reforestación con esta especie. Por otro lado, no se encontraron diferencias significativas en la altura de las plantas entre los diferentes tratamientos ($P = 0.7561$). La falta de diferencias significativas puede indicar una uniformidad en el crecimiento vertical de las plantas, posiblemente debido a condiciones ambientales homogéneas o a una respuesta similar de la especie a los tratamientos aplicados. Sin embargo, el diámetro basal de las plantas mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($P = 0.0117$) siendo el ensamble el tratamiento en donde se presenta el mayor diámetro basal promedio en los árboles (Fig. 24). Este resultado sugiere que los diferentes tratamientos influyen en el grosor de la base de los tallos de *Pinus devoniana*. Las diferencias observadas pueden estar

relacionadas con la disponibilidad de recursos y las condiciones de competencia entre las plantas en los diferentes tratamientos.

Figura 24. Supervivencia y diámetro basal por tratamiento de *Pinus devoniana*.

Entre las densidades de plantación para la especie *Pinus devoniana* en la microcuenca Ejido San Martín, el análisis de varianza muestra que, en la supervivencia



de las plantas, existen diferencias altamente significativas ($P = 0.0008$), siendo la densidad baja (3 m) en donde se observa la mayor tasa de supervivencia (Fig. 25). Este resultado sugiere que la densidad de plantación ejerce un impacto significativo en la capacidad de supervivencia de esta especie en esta área específica de reforestación. Además, la altura ($P = 0.0015$) y el diámetro basal de las plantas ($P \leq 0.0001$) también mostraron diferencias significativas entre las distintas densidades de plantación siendo la densidad alta (2 m) en donde se observa la mayor altura promedio y el mayor diámetro basal en los árboles (Fig. 25). Esto significa, que la densidad de plantación influye de manera significativa en el crecimiento vertical y el engrosamiento del tallo de *Pinus devoniana*. Es posible que estas variaciones reflejen cómo diferentes densidades de plantación afectan la competencia por recursos, lo que a su vez impacta en el desarrollo en altura de las plantas. Es posible que densidades más bajas permitan un mayor acceso a recursos para el crecimiento de las plantas en comparación con densidades más altas.

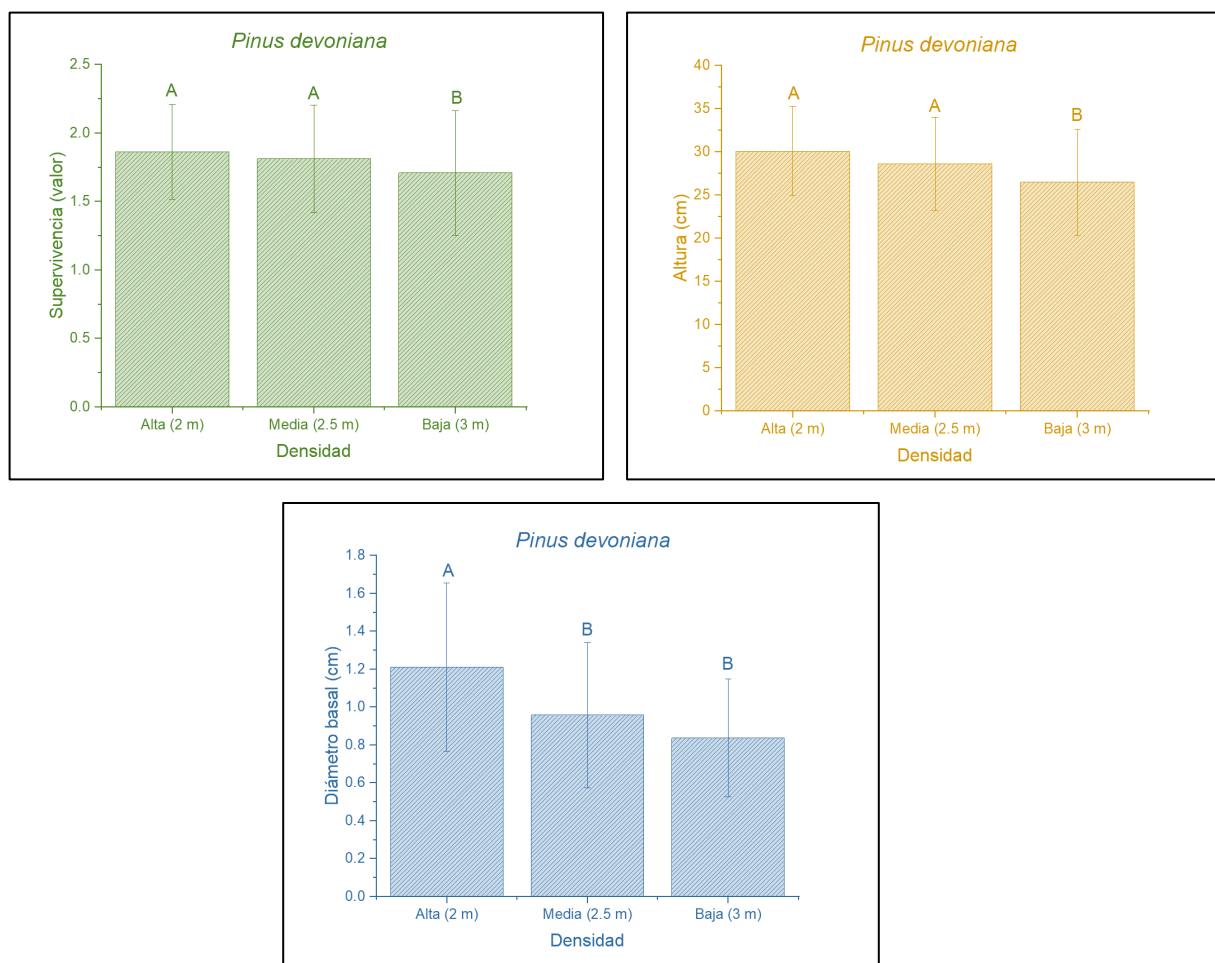


Figura 25. Supervivencia, Altura y Diámetro basal por densidad en *Pinus devoniana*.

En la interacción (tratamiento*densidad) para la especie *Pinus devoniana* en las reforestaciones llevadas a cabo en la microcuenca Ejido San Martín, el análisis de varianza muestra que, en la supervivencia de las plantas no se encontraron diferencias significativas ($P = 0.0932$), lo cual nos dice que la combinación de diferentes tratamientos y densidades de plantación no afecta de manera considerable la capacidad de supervivencia de esta especie en este sitio de estudio. En lo que respecta a la altura de las plantas, tampoco se encontraron diferencias significativas en la interacción tratamiento por densidad ($P = 0.1204$). Esto representa, que independientemente del tratamiento aplicado y la densidad de plantación, la altura de *Pinus devoniana* en la microcuenca Ejido San Martín se mantiene relativamente uniforme. Por otro lado, el

diámetro basal de las plantas mostró diferencias significativas en la interacción tratamiento por densidad ($P = 0.0017$). Este resultado sugiere que los diferentes tratamientos aplicados tienen un impacto significativo en el grosor de la base de los tallos de esta especie, dependiendo de la densidad de plantación. Las diferencias observadas pueden estar relacionadas con la disponibilidad de recursos y la competencia entre las plantas en los distintos tratamientos y densidades de plantación.

En conjunto, nuestros resultados subrayan la importancia de adaptar las estrategias de reforestación a las condiciones locales y características de las especies. Aunque algunos patrones son consistentes entre microcuencas, como el buen desempeño de *Fraxinus spp.*, otros son altamente dependientes del contexto ambiental, como la respuesta de *Pinus devoniana* a densidades altas en San Martín. Estas diferencias reflejan cómo las interacciones entre tratamientos, densidades y especies pueden variar incluso en regiones cercanas, lo que refuerza la necesidad de enfoques personalizados para optimizar los resultados de reforestación.

Sin la colaboración de los actores involucrados voluntarios, habitantes de comunidades locales, instituciones educativas y asociaciones civiles, los resultados alcanzados en las estrategias de reforestación no habrían sido posibles.

9. Conclusiones

Los mayores porcentajes de supervivencia se obtuvieron en las plantaciones monoespecíficas, particularmente en *Prosopis laevigata* en la microcuenca Ajuchitlancito, y en el tratamiento de ensamble con *Fraxinus spp.* en el Ejido San Martín. Sin embargo, el análisis estadístico no mostró diferencias significativas en la supervivencia entre las diferentes especies ni entre las densidades de plantación. A los nueve meses de este estudio, se cuenta con observaciones preliminares que permiten un acercamiento inicial a la evaluación de la plantación. Para obtener conclusiones más robustas y significativas, es necesario esperar a que al menos se complete un ciclo anual, o incluso varios años, para evaluar mejor la supervivencia y el crecimiento de las especies plantadas.

Este estudio aporta información valiosa para la planificación de programas de reforestación a nivel de cuenca, destacando la importancia de adaptar las estrategias según las condiciones locales y las especies utilizadas. Además, resalta la relevancia del enfoque de cuenca como una unidad de gestión integral, que considera las interacciones ecológicas, sociales y productivas del territorio, así como la participación de los actores locales —ejidatarios, propietarios, organizaciones y autoridades— en el diseño, implementación y seguimiento de las acciones de reforestación.

Esta evaluación permite identificar combinaciones óptimas de especies, tratamientos y densidades que pueden maximizar la supervivencia y el desarrollo de las plantaciones, promoviendo un uso más eficiente de los recursos. Asimismo, el enfoque basado en la sistematización de resultados contribuye al desarrollo de un modelo de mejora continua en la gestión de cuencas, facilitando la toma de decisiones informada por parte de propietarios, ejidatarios, organizaciones y autoridades ambientales. En el largo plazo, estas estrategias pueden incrementar el impacto positivo de los programas de reforestación, favoreciendo la recuperación de los servicios ecosistémicos y la resiliencia de los ecosistemas.

10. Recomendaciones

Para la toma de decisiones futuras en la reforestación de estas microcuencas, se recomienda una evaluación integral de las características de cada lugar, incluyendo aspectos como el tipo de suelo, las condiciones climáticas, la pendiente del terreno y la vegetación presente en cada zona. Estos factores pueden influir notablemente en la supervivencia y el crecimiento de las especies plantadas. Es esencial desarrollar planes de reforestación específicos basados en un entendimiento detallado de las condiciones locales, con el fin de maximizar las tasas de supervivencia y asegurar el éxito a largo plazo de los esfuerzos de reforestación en cada microcuenca. En lugares con problemas fuertes de erosión y compactación del suelo es importante, antes de llevar a cabo cualquier programa de reforestación, implementar programas de restauración que favorezcan el establecimiento de la vegetación y la retención y protección del suelo, y elegir especies resistentes a condiciones adversas de sitios degradados.

La metodología basada en un enfoque científico, la sistematización de la información, así como el monitoreo y evaluación constante, son importantes para futuras investigaciones y proyectos de reforestación. Además, un enfoque integral de cuenca, que incluya un conocimiento detallado de las funciones de cada zona, es fundamental y beneficioso para elegir la mejor estrategia de reforestación.

Finalmente, la participación social y de actores de diversos sectores, junto con la apropiación comunal de los procesos de reforestación son cruciales para lograr su éxito. La participación de las comunidades locales no solo facilita la implementación de las estrategias, sino que también asegura la sostenibilidad a largo plazo de los proyectos de reforestación, promoviendo un sentido de responsabilidad y cuidado hacia los recursos naturales.

11. Referencias bibliográficas

- Acosta, D., González, C., Guzmán, R. y Rodríguez, D. (2019). *Reforestación agroecológica: una alternativa para la protección del recurso hídrico*. Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO.
- Álvarez Z. Y Márquez M.A. (1995). Construcción de una guía de densidad para *Pinus cooperi* var. *ornelasi* con base en la clase de copa en Durango, México. *Madera y Bosques*. <https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/1396/1564>
- Ángeles-Pérez, G., Aldrete, A., Hernández, P., Ventura-Ríos, A. y Plascencia-Escalante, F.O. (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. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000100007>
- Becerra, F. (1986). *Determinación de una guía de densidad para Pinus patula Schl. et Cham. en la región de Chignahuapan-Zacatlán, Puebla*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México.
- Blanco-García, J., Gómez, M., Linding, R., Sáenz, C., Soto, J. y Villegas, J. (2012). Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia*, 46(8), 795-807. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952012000800005&script=sci_arttext
- Cambrón, V.H., Renaud, R. y Soto, J.C. (2019). Atributos de las especies arbóreas y su carbono almacenado en la vegetación del municipio de Querétaro, México. *Madera y bosques*, 25(1), e2511699. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511699>
- Cambrón, V.H., Ledesma, M.C., Luna, H., Renaud, R. y Soto, J.C. (2018). *Diseño de arreglos espaciales para reforestar el matorral subtropical con distintos enfoques en el municipio de Querétaro*. Fondo Editorial Universidad Autónoma de Querétaro.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2023). *Distribución de las especies*. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx>
- CONABIO. (1992). *Eysenhardtia polystachya (Ortega) Sarg.* En *The Silva of North America* (Vol. 3, p. 29). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la

Biodiversidad.

http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/28-legum18m.pdf

- Cotler, H., Galindo, A., González, I., Pineda, R. y Ríos, E. (2013). *Cuencas Hidrográficas, fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. SEMARNAT.
- Cotler, H. y Priego, A. (2004). El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma-Chapala, pp. 63-74. En: Cotler, H. (comp.), *El manejo integral de cuencas en México: Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2008/06/El-Manejo-Integral-de-Cuencas-en-Mexico-segunda-edici%C3%B3n.pdf>
- Corvalán V., P. y J. Hernández P. (2006). *Densidad de rodal*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Cátedra de Dasometría. Chile. <https://www.scribd.com/document/470726338/Corvalan-y-Hernandez-2006-Densidad-del-Rodal>
- Cuevas, M. L., Garrido, A., Pérez, J.L. y Iura, D. (2010). Estado actual de la vegetación en las cuencas de México. En Cotler, H. (Ed.), *Las cuencas hidrográficas de México* (pp. 50-58). Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V.
- El Maíz más Pequeño, A.C. (2020). *Diagnóstico cultural, proyecto de instalación de huertos de traspatio y sistemas de captación de agua de lluvia en localidades de alta y muy alta marginación*. SEDEA.
- ESPINOSA, D. (2008). El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural. pp. 33-65. En: Sarukhán, J. (Coord. Gral.). *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. México: CONABIO. http://centro.paot.org.mx/documentos/conabio/capital_natural.pdf
- Fahey, T. J., Woodbury, P. B., Battles, J. J., Goodale, C. L., Hamburg, S. P., Ollinger, S. V., y Woodall, C. W. (2010). Forest carbon storage: Ecology, management, and policy. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(5), pp. https://www.researchgate.net/publication/279921269_Forest_carbon_storage_Ecology_management

- Ferreira, M., H.T.Z. Couto y Mascarenhas S. (1972). The introduction of Mexican pines into the region of Poços de Caldas. *IPEF Piracicaba* 4:95-109.
- Flores, F. J., y H. K. Allen. (2004). Efectos del clima y capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la productividad de rodales de pino radiata en Chile: un análisis utilizando el modelo 3-PG. *Bosque (Valdivia)* 25(3): 11–24. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002004000300002
- Francis, J. K. (1990). *Fraxinus uhdei* (Wenzig) Lingelsh. Fresno, tropical ash (SO-ITF-SM-28). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station.
- Garrido, A., Pérez, J.L. y Enríquez, C. (2010). Delimitación de las zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México en Cotler, H. (Ed.), *Las cuencas hidrográficas de México* (pp. 14-17). Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V.
- Gómez, E., González, M., Musálem, K., Noguera, E. y Ramírez, N. (2014). *Estrategias para una construcción social de la restauración forestal en comunidades de la cuenca media y alta del río Grijalva*. Colegio de la frontera sur. <https://www.researchgate.net/publication/269039877>
- González-Espinosa, M., Parra-Vázquez, M. R., Huerta-Silva, M. H., Ramírez-Marcial, N., Armesto, J. J., Brown, A. D., Echeverría, C., Ferguson, B. G., Geneletti, D., Golicher, J. D., Gowda, J., Holz, S. C., Ianni, E., Lara, A., López-Barrera, F., Kitzberger, T., Malizia, L., Manson, R. H., Montero-Solano, J. A. y Newton, A. C. (2011). Desarrollo de recomendaciones sobre políticas públicas y estrategias de gestión para la restauración de paisajes con bosques secos. En A. C. Newton & N. Tejedor (Eds.), *Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal, estudios de caso en las zonas secas de América Latina* (pp. 327-376). Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales.
- H. Ayuntamiento Amealco de Bonfil. (2015-2018). *Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio de Amealco de Bonfil, Querétaro*. Secretaría de Desarrollo Sustentable.
- Hernández, L., Bustos, D.E., González M.E., Malda, G., Suzán, H. y Terrones, R. (2010). *Establecimiento y crecimiento en las primeras etapas de diez especies arbustivas*

- nativas, en sitios deforestados de la Microcuenca de Santa Rosa Jáuregui, Querétaro, México. CIENCIA UAQ, 3(2): 27-41.*
https://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v3-n2/Establecimiento.pdf
- Hernández, L. y Martínez M. (2014). *Guía ilustrada de la flora del Valle de Querétaro*. Universidad Autónoma de Querétaro, Editorial Universitaria, Colección Academia, Serie Nodos. CONABIO.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1996). *Amealco de Bonfil, Estado de Querétaro*. Cuaderno Estadístico Municipal (pp. 5-7).
https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1334/702825926274/702825926274_1.pdf
- Linding, R. (2017). *Ecología de restauración y restauración ambiental*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Magallón, H. (2011). *Revolución forestal. Hacia una nueva política forestal para detener el cambio climático*. Greenpeace México, A.C.
- Microsoft Corporation. (2024). *Microsoft Excel* (versión 16.0) [Software].
<https://office.microsoft.com/excel>
- Musálem, M.A. y Fierros, A.M. (1996). *Curso de silvicultura de bosques naturales*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
https://issuu.com/alejandrovellazquezmartinez/docs/1996_apuntes_silvicultura__musalem_REVISAR
- Navarro-Salas, E. N., Pérez-Damián, J.L., Remond-Noa, R., Rosete-Vergés, F. A., Salinas-Chávez, E. y Villalobos-Delgado, M. (2014). *El avance de la deforestación en México 1976-2007*. Madera y bosques, 20(1), 21-35.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000100003&lng=es&tlng=es
- Nelder, J. A. y Wedderburn, R. W. M. (1972). Generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, 135(3), pp. 370-384
<https://www.medicine.mcgill.ca/epidemiology/hanley/bios601/Likelihood/NelderWedderburn1972.pdf>

- Omary, A. (2011). Effects of aspect and slope position on growth and nutritional status of planted Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in a degraded land semi-arid areas of Jordan. *New Forests* 42:285–300.
- <https://www.proquest.com/docview/897818321?sourcetype=Scholarly%20Journals>
- Ortega, S. y Soares, D. (2021). Percepción social sobre participación en actividades de conservación de bosques: Una mirada desde la microcuenca Ichupio, lago de Pátzcuaro, México. *Sociedad y Ambiente*, 24, 2021, ISSN: 2007-6576, pp. 1-27. doi: 10.31840/sya.vi24.2304
- Pineda, R., Briceño, M.A., Domínguez, M.A., Fonseca, A.L., García, M.P., Gilio, M.C., Quintanar, E., Rickards, J., Roitman, P. y Vázquez, G. (2007). Hacia una gestión integrada de cuencas en el estado de Querétaro, México. *El manejo integral de cuencas en México, estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*, (pp. 313-338). Instituto Nacional de Ecología.
- Ramakrishna, B. (1997) *Estrategia de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias*. San José, Costa Rica: IICA-BMZ/GTZ. https://www.google.com.mx/books/edition/Estrategias_de_extensi%C3%B3n_para_el_manejo/_JJL28RE5CIC?hl=es&gbpv=1&printsec=frontcover
- Revelle, W. (2021). *Psych* (versión 2.4.6). Recuperado de <https://cran.r-project.org/package=psych>
- Rodríguez, E. N., Rojo, G. E., Ramírez, B., Martínez, R., Cong, M.C., Medina, S. M. y Piña, H. H. (2014). Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) en México. *Ra Ximhai*, 10(3), pp. 173–193. Universidad Autónoma Indígena de México.
- Romero, C. (2022). *Manual de buenas prácticas para reforestar en Querétaro*. Bajo Tierra Museo del Agua editorial.
- SAS Institute Inc. (2021). SAS/STAT® 14.3 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Sáenz, C., y Lindig C. (2004). Evaluación y propuestas para el programa de reforestación en Michoacán, México. *Ciencia Nicolaita* 37: 107–122.
- Sáenz, C., Aguilar, S., Silva, M. A., Madrigal, X., Lara, S. y López, J. (2012). Variación morfológica altitudinal entre poblaciones de *Pinus devoniana* Lindl. y la variedad

- putativa *cornuta* en Michoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 3(13), pp. 19-28.
- Segura, S. G. (2005). Las especies introducidas: ¿benéficas o dañinas? En O. Sánchez, E. Peters, R. Márquez, E. Vega, G. Portales, M. Valdez, & D. Azuara (Eds.), *Temas sobre restauración ecológica* (pp. 127-133). Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- SEMARNAT. (2019) *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*.
- SEMARNAT. (2010) *Prácticas de reforestación, manual básico*.
- Spurr, S.H. y Barnes B.V. (1980). *Ecología Forestal*. 3a ed. AGT editor. S.A. México.
https://books.google.com.mx/books/about/Ecologi%C3%A1_forestal.html?id=ZyBhAAAAMAAJ&redir_esc=y
- Tesorería Municipal de Pedro Escobedo. (2017). *Notas de los estados financieros* (pp. 12-13). Administración Municipal. <https://pedroescobedo.gob.mx/wp-content/uploads/2019/01/D2.7-NOTAS-A-LOS-ESTADOS-FINANCIEROS.pdf>
- Vanegas, M. (2016). *Manual de mejores prácticas de restauración de ecosistemas degradados, utilizando para reforestación solo especies nativas en zonas prioritarias*. CONAFOR, CONABIO, GEF-PNUD. México.
- Viveros, V. H., Sáenz, C., Vargas, H. y López, J. (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios de Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2), pp. 121-131.
- Wickham, H. (2023). *ggplot2* (versión 3.5.1). Recuperado de <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Zamudio, S., Rzedowski, J., Carranza, E., y Calderón, G. (1992). *La vegetación del estado de Querétaro*. Instituto de Ecología, Centro Regional Bajío.

ANEXOS

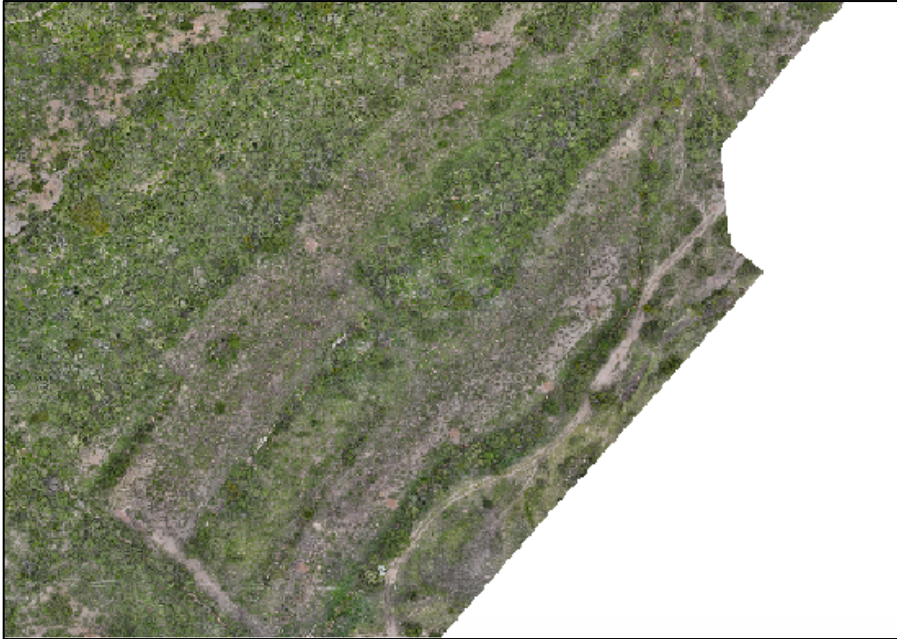


Figura 26. Imagen aérea de la zona reforestada de la microcuenca Ajuchitlancito, tomada por Luna-Soria 2023.



Figura 27. Imagen de la zona de reforestación en la microcuenca Ejido San Martín, tomada por: Luna-Soria, 2023