

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Facultad de Ciencias Naturales

Facultad de Ingeniería

Facultad de Psicología

Facultad de Filosofía

Facultad de Ciencias Políticas y Sociales

Facultad de Química

**BARRERAS VIVAS, UNA PRÁCTICA DE RESTAURACIÓN EN UN
PAISAJE AGRÍCOLA DE LA MICROCUENCA BUENAVISTA,
QUERÉTARO.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado en Maestro en Gestión
Integrada de Cuencas

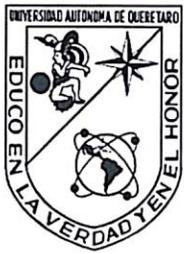
Presenta:

Biol. Carlos Martínez Zepeda

Dirigido por:

Dra. Tamara Guadalupe Osorno Sánchez

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO. 2018



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

**Barreras vivas, una práctica de restauración
en un paisaje agrícola de la microcuenca Buenavista, Querétaro.**

Opción de titulación

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta:

Biól. Carlos Martínez Zepeda

Dirigido por:

Dra. Tamara Guadalupe Osorno Sánchez

Dra. Tamara Guadalupe Osorno Sánchez
Presidente

Firma

Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero
Secretario

Firma

Dra. Norma Eugenia García Calderón
Vocal

Firma

M. en G.I.C. Liliana González Erives
Suplente

Firma

Dra. María Virginia Cervantes Gutiérrez
Suplente

Firma

Dra. C.S. Juana Elizabeth Elton
Puente
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca-Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.

Noviembre 2018

RESUMEN

En México el estudio de sistemas agroforestales, en especial Barreras Vivas (BV), debe ser abordado como una estrategia de restauración funcional en el paisaje. En el municipio de Querétaro, la microcuenca Buenavista alberga sistemas de BV las cuales están en peligro de desaparecer; ante esta situación es relevante estudiar estos sistemas para vislumbrar su papel en el funcionamiento del territorio. El objetivo de la presente investigación es identificar la distribución espacial y composición de especies de estos sistemas por zona funcional de la microcuenca; diseñar y establecer nuevas barreras usando especies nativas y frutales para evaluar la viabilidad de estos sistemas en restauración. La identificación de las BV empleó el Índice de Vegetación Normalizada; se calcularon las zonas funcionales (ZF) de la microcuenca; se realizaron recorridos de campo para identificar la estructura y composición de las barreras por ZF. Para evaluarlos como estrategia de restauración se diseñaron e implementaron BV en predios agrícolas monitoreando la supervivencia, crecimiento y avistamientos de fauna, asimismo se compararon cambios en las condiciones edáficas. Como resultados se encontró que estos sistemas abarcan el 8.99% de la superficie agrícola del total de 6,215.06 ha que conforman el paisaje, encontrándose en límites de predios, en bordes de terrazas, orillas de caminos y en áreas ribereñas, predominando en la ZF baja donde se desarrolla la agricultura. Se encontró que las BV son remanentes de vegetación natural y en zonas bajas estos son inducidos. Se encontró que estos sistemas presentan baja supervivencia (31.14%); las especies más aptas fueron *Eysenhardtia polystachya*, *Erythrina coralloides* y *Punica granatum*. Las BV recién establecidas, fungen como hábitat para insectos. Los cambios en las condiciones edáficas entre las BV y el suelo agrícola mostraron que los suelos Vertisol y Kastañozem 2 las barreras vivas favorecen el mejoramiento de las condiciones edáficas, al contrario que en el suelo Kastañozem 1 donde los sitios agrícolas tienen mejores condiciones edáficas. Se concluye que las BV pueden jugar un papel importante en el funcionamiento de la cuenca al mitigar procesos erosivos, estabilizar terrenos, ofrecer hábitat para la fauna y mejorar las condiciones edáficas.

(Palabras clave: restauración, barreras vivas, paisaje agrícola, microcuenca)

SUMMARY

In Mexico, the study of agroforestry systems, especially Living Fences (LF) should be approached as a strategy of functional restoration in the landscape. In the municipality of Querétaro, the Buenavista watershed houses LF systems which are in danger of disappearing; given this situation, it is important to study these systems in order to see their role in the functioning of the territory. The objective of this research is to identify the spatial distribution and composition of species of these systems by functional area of the watershed; design and establish new barriers using native and fruit species to evaluate the feasibility of using these systems in restoration. The identification of the LF used the Normalized Vegetation Index; the Functional Zones (FZ) of the watershed were calculated; field trips were conducted to identify the structure and composition of the barriers by FZ. To evaluate them as a restoration strategy, LF was designed and implemented in agricultural lands monitoring survival, growth and sightings of diverse fauna, and changes in soil conditions were compared. As results, it was found that these systems cover 8.99% of the agricultural area of the total of 6,215.06 ha that make up the landscape, being located on property boundaries, on the edges of terraces, on roadsides and in riverine areas, predominating in the low FZ where the farming. It was found that the LF are remnants of natural vegetation, and in low FZ these systems are induced. It was found that these systems have low survival (31.14%); the most suitable species were *Eysenhardtia polystachya*, *Erythrina coralloides* and *Punica granatum*. The newly established LF act as habitat for insects. Changes in soil conditions between the BV and the agricultural soil showed that the Vertisol and Kastañozem 2 soils, the living barriers, favor the improvement of the edaphic conditions, in contrast to the Kastañozem 1 soil where the agricultural sites have better edaphic conditions. It is concluded that LF can play an important role in the functioning of the watershed by mitigating erosive processes and stabilizing land, offering a habitat for fauna and improving soil conditions.

(Key words: restoration, live fences, agricultural landscape, watershed)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre Sara, mi padre Carlos, y mi hermano Omar, por su apoyo incondicional, por soportar mi mal humor, mis incoherencias y caprichos académicos.

A Gabi, por leerme y apoyarme cuando no sabía ni que hacer. Te quiero.

A Gemma Limón, por apoyarme y abrir las puertas de su hogar.

A Doña Eulalia, a Don Salvador y a Don Guadalupe por su hospitalidad, su dedicación y sus esfuerzos para que el presente proyecto se pudiera llevar a cabo. Ustedes son las manos que hacen funcionar el mundo.

A la Dra. Tamara Guadalupe Osorno Sánchez, por aceptar dirigir el presente proyecto de tesis y apoyarme económicamente.

Al Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero, por asesorarme y apoyarme económicamente.

A la Dra. Norma Eugenia García Calderón, por brindarme apoyo y educación.

A la Dra. María Virginia Cervantes Gutiérrez, por su guía, paciencia y crítica.

A la M. en G.I.C. Liliana González Erives, por su mucha paciencia y apoyo en todo el trabajado de campo.

A la M. en C. Elizabeth Fuentes Romero, por su asesoría y paciencia en mi aprendizaje sobre la vida en el suelo.

A Luis, por iniciarme en el mundo de la edafología. Irás al cielo de los edafólogos.

A todos aquellos que conocí en estos dos años y han aportado su granito de arena para que este documento haya podido ser realidad.

Al Centro Regional de Capacitación en Cuencas, por financiar el presente proyecto.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro y al CONACyT por generar las oportunidades para iniciar y terminar mis estudios de posgrado.

TABLA DE CONTENIDOS

Introducción general	1
Capítulo I – Restauración del paisaje y manejo de cuencas hidrográficas	5
1.1 Una aproximación a la restauración.....	6
1.2 La restauración del paisaje.....	8
1.3 Manejo integrado de cuencas hidrográficas y restauración.....	11
1.4 Consideraciones finales	15
Capítulo II: Identificación y caracterización de sistemas agroforestales en el paisaje agrícola de la microcuenca Buenavista	16
2.1 Introducción.....	16
2.2 Métodos.....	19
2.2.1 Zona de estudio	19
2.2.2 Identificación de zonas funcionales de la microcuenca	22
2.2.3 Identificación de las barreras vivas.....	23
2.2.4 Caracterización de la composición y estratos de las barreras vivas.....	26
2.3 Resultados.....	28
2.3.1 Zonas funcionales de la microcuenca Buenavista	28
2.3.2 Distribución de barreras vivas en el paisaje agrícola	30
2.3.3 Composición de especies y estratos de las barreras vivas	33
2.3.4 Abundancia de especies por zona funcional.....	35
2.4 Discusión.....	38
2.5 Consideraciones finales	42
Capítulo III: Barreras vivas como potencial estrategia de restauración	43
3.1 Introducción.....	43
3.2. Métodos.....	46
3.2.1 Área de estudio.....	46
3.2.2 Diseño y establecimiento las barreras	48
3.2.3 Monitoreo de las barreras	51
3.2.4 Percepción e historicidad de las barreras.....	53
3.3 Resultados.....	54
3.3.1 Supervivencia de las barreras vivas.....	54
3.3.2 Comportamiento de desarrollo de las especies.....	55
3.3.3 Crecimiento de las especies sembradas	59
3.3.4 Condiciones edáficas en sitios con barreras vivas nuevas.....	60

3.3.5 Observaciones de aves y fauna diversa.....	67
3.3.6 Percepción e historicidad de las barreras.....	69
3.4 Discusión.....	70
3.5 Consideraciones finales	78
Discusión general.....	80
Conclusiones	84
Bibliografía	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Mapa de ubicación de la microcuenca Buenavista.....	21
Figura 2. Diagrama metodológico para identificar y caracterizar barreras vivas.	22
Figura 3. Modelo cartográfico para identificar la cobertura las barreras vivas.....	25
Figura 4. Sitios de muestreo para caracterizar las barreras vivas de la microcuenca.	27
Figura 5.- Distribución altimétrica de las zonas funcionales de la microcuenca.	28
Figura 6.- Zonas funcionales de la microcuenca.	29
Figura 7.- Zonas agrícolas por zona funcional de la microcuenca.	30
Figura 8.- Vegetación identificada como barreras vivas en zonas agrícolas.....	31
Figura 9.- Barreras vivas identificadas por zona funcional en el paisaje agrícola.....	32
Figura 10.- Abundancia por especie en barreras vivas de la zona funcional alta.	36
Figura 11.- Abundancia por especie en barreras vivas de la zona funcional media.	36
Figura 12.- Abundancia por especie en barreras vivas de la zona funcional baja.	37
Figura 13.- Ubicación de las parcelas y sitios elegidos para la siembra de las barreras vivas.	47
Figura 14.- Distribución espacial de los árboles en las barreras vivas.	50
Figura 15.- Ruta y sitios de muestreo para avistamiento de aves.	53
Figura 16.- Porcentaje de supervivencia de las especies por predio.	55
Figura 17.- Dimensiones mensuales de <i>E. coralloides</i>	56
Figura 18.- Dimensiones mensuales de <i>F. carica</i>	57
Figura 19.- Dimensiones mensuales de <i>E. polystachya</i>	58
Figura 20.- Dimensiones mensuales de <i>P. granatum</i>	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Uso de suelo por zona funcional de la microcuenca Buenavista.....	29
Tabla 2.- Superficie de barreras vivas en el paisaje agrícola de la microcuenca.	32
Tabla 3.- Especies encontradas en las barreras vivas en la microcuenca.....	33
Tabla 4.- Especies presentes en las barreras vivas según zona funcional.	35
Tabla 5.- Altura media de las barreras vivas por zona funcional (m).....	37
Tabla 6.- Productores y predios para la implementación de barreras vivas.	47
Tabla 7.- Información biológica y ecológica de las especies empleadas en barreras.....	48
Tabla 8.- Especies y cantidades empleadas en la conformación de las barreras vivas.	49
Tabla 9.- Costo de árboles para conformación de barreras.	49
Tabla 10.- Número de árboles sembrados por barrera viva.....	50
Tabla 11.- Crecimiento parcial acumulado de las especies.	60
Tabla 12.- Diferencias físicas y químicas de grupos de suelos bajo distintos tipos de manejo.	61
Tabla 13.- Descripción morfológica de Vertisol.	63
Tabla 14.- Descripción morfológica de Kastanozem_1.....	65
Tabla 15.- Descripción morfológica de Kastañozem_2.....	67
Tabla 16.- Taxas encontrados en barreras vivas y ambientes asociados.....	68

Introducción general

El manejo integrado de cuencas busca el aprovechamiento adecuado de los recursos naturales con el objeto de impulsar el desarrollo socioeconómico, mejorar la calidad de vida y mantener o mejorar la calidad ambiental de las cuencas. Este proceso involucra resolver problemáticas comunes a diversos actores e instituciones de una cuenca por medio de la cooperación y coordinación, a la par que genera beneficios socioeconómicos que surgen de mantener las funciones ecológicas y sociales en un proceso de manejo y gestión adaptativa (Paré y Gerez, 2012). Las acciones de manejo se fundamentan en el planteamiento de soluciones concretas con visión a largo plazo; las cuales pueden generalizarse en tres grandes rubros: aprovechamiento, conservación y restauración de los recursos naturales (Cotler y Caire, 2009).

La restauración ocupa un lugar especial en el manejo de recursos, ya que busca la recuperación de espacios y procesos que se han perdido en la cuenca y que afectan su adecuada funcionalidad. Estas actividades generalmente se ejecutan en zonas de la cuenca dónde se requiere la recuperación de funciones específicas por ejemplo, captación e infiltración de agua en la zona funcional alta o bien, en aquellos sitios frágiles donde el esquema de manejo actual puede derivar en consecuencias desfavorables a largo plazo (Cotler y Caire, 2009).

Generalmente, las acciones de restauración se efectúan en sitios donde los recursos naturales han sido degradados a tal punto que ya no proveen bienes y servicios a los habitantes de la zona; ante esta situación surge la necesidad de recuperar estos sitios para que vuelvan a proveer de bienes y servicios a las personas.

Dentro de la restauración pueden considerarse varias vertientes, 1) la restauración ecológica cuando se busca recuperar un ecosistema y/o los procesos ecológicos dando especial interés a la biodiversidad nativa, 2) la restauración funcional, la cual busca recuperar procesos y funciones de un sitio o ecosistema sin enfatizar en la composición de especies. La primera vertiente puede aplicarse a la

restauración de selvas o sitios naturales con poca intervención humana histórica, mientras que la segunda vertiente puede ejecutarse en sistemas antes naturales altamente transformados, como los son los campos agrícolas, cultivos forestales, vegetación ribereña, etcétera, donde aún se realicen actividades de aprovechamiento de los recursos naturales o se pretenda hacerlo. Esta última vertiente es en la que se orienta el presente documento.

En zonas agrícolas el recurso que principalmente se degrada, generalmente por su inadecuado manejo, es el suelo. El cuál es el sostén de las actividades agrícolas y de la vegetación tolerada en estos sistemas productivos, la cual a su vez provee de hábitat a la biodiversidad tolerante a ambientes transformados; por ello es necesario prevenir la degradación del suelo o bien desencadenar procesos de restauración cuando se requiera.

Una estrategia de restauración para lograr este cometido son los sistemas agroforestales, los cuales permiten conjugar la restauración y el aprovechamiento de los recursos agrícolas. Estos sistemas pueden utilizarse en casos donde se requieran acciones de restauración en paisajes agrícolas con problemas de degradación ambiental que afecten la funcionalidad de la cuenca; o bien, se busque fortalecer la participación social y la aplicación de conocimientos tradicionales en procesos de restauración (Ceccon, 2013; Moreno-Calles *et al.*, 2013).

En Latinoamérica, un sistema agroforestal ampliamente usado son las barreras vivas (Bravo *et al.*, 2005), las cuales consisten en la siembra de especies leñosas perennes para delimitar predios (López, 2007; Ceccon, 2013). Las barreras presentan beneficios útiles tanto para la restauración como el aprovechamiento de los recursos, ya que favorecen la creación de hábitats y brindan alimentos para fauna silvestre (Harvey y Haber, 1999), mejoran la conectividad ecológica a escala de paisaje y proveen de materiales útiles (Harvey *et al.*, 2005).

El estudio de las barreras vivas adquiere importancia, en cuencas donde la expansión de las urbes y el abandono del campo presentan escenarios que amenazan los paisajes agrícolas y los sistemas agroforestales que albergan. Como es el caso de la zona centro del país, en especial el estado de Querétaro; entidad

que se caracteriza por ser una de las zonas del país con mayor crecimiento económico y urbano en la última década, y por ende, requiere especial atención en torno a la conservación, aprovechamiento y restauración de sus recursos naturales.

Un territorio embebido en este panorama es la microcuenca Buenavista, ubicada al norte del municipio de Querétaro, de uso agrícola, presenta problemas de degradación ambiental principalmente del suelo y vegetación, por ende, la productividad agrícola ha disminuido paulatinamente, y como consecuencia, obliga a los agricultores a buscar nuevas alternativas que les permitan generar ingresos para subsistir (PRPC, 2010). En dicha microcuenca se tiene conocimiento de la existencia de barreras vivas en el paisaje agrícola, las cuales corren riesgo de desaparecer debido al abandono del campo, cambios socioeconómicos y la degradación ambiental. La pérdida de las barreras vivas puede agravar los problemas ambientales existentes y desencadenar otros no previstos que afecten el adecuado funcionamiento de la cuenca y empeorar la situación socioeconómica local.

Ante este panorama surgen varias interrogantes: ¿Dónde se encuentran las barreras vivas en el paisaje agrícola de esta microcuenca? ¿Cuáles son las especies que las componen? ¿Qué papel están jugando en la conectividad del paisaje y en el funcionamiento de la microcuenca? ¿Estos sistemas suponen una potencial estrategia de restauración? ¿Qué influencia tienen estos sistemas en el recurso edáfico? ¿Qué tan viable es establecer nuevas barreras?

La presente investigación se identificó como se distribuyen las barreras vivas en la microcuenca por zona funcional, así como las especies que las conforman. A partir de esta información se diseñaron y establecieron nuevas barreras vivas empleando especies nativas y frutales, con el fin de evaluar si el diseño de estos sistemas funge como una estrategia de restauración funcional en el paisaje agrícola. En dicha intervención se monitoreó el crecimiento y supervivencia de las barreras vivas, y cómo estas influyen en las condiciones edáficas donde se desarrollan.

El presente documento está estructurado en tres capítulos, a modo de artículos, donde se buscará resolver los objetivos particulares antes planteados.

El primer capítulo consta de una aproximación teórica del origen y evolución de la restauración ecológica y su aplicación a escala del paisaje y cómo ésta ha demostrado tener potencial para promover la participación de diversos actores sociales en la toma de decisiones, mejorar las condiciones ambientales, y mantener el aprovisionamiento de bienes y servicios ecosistémicos. Asimismo, expone como el enfoque de cuencas puede por un parte coadyuvar para cumplir los objetivos de la restauración, al evidenciar las interacciones que tienen lugar bajo distintos usos del suelo y los actores involucrados en todo el territorio; por otra parte, apoyar procesos de gestión combinada que incluyan prácticas de manejo y conservación de los recursos naturales en pro de una mejora de calidad de vida de los habitantes.

En el segundo capítulo se pretende conocer cómo la distribución espacial y la composición de las barreras vivas pueden favorecer la conectividad del paisaje, a la par que aportan beneficios agronómicos y ecológicos que reditúan positivamente en la cuenca. Por ello, en esta sección se busca identificar y caracterizar las barreras vivas por zonas funcionales en un paisaje agrícola de una microcuenca, para así determinar su posible papel en la conectividad de paisaje y a grandes rasgos en el funcionamiento de la microcuenca.

El tercer capítulo busca discernir si las barreras vivas pueden ser una estrategia de restauración en el paisaje agrícola. Para ello se realizó una intervención en campo por medio de la siembra de nuevas barreras; se evaluó el éxito de dicha implementación por medio de monitoreo de la supervivencia y crecimiento de los árboles, cambios en las condiciones edáficas y el hábitat potencial que representan estas barreras para diversos tipos de organismos.

Finalmente, se presenta la discusión general de todo el documento y las posibles líneas de investigación a desarrollar.

Capítulo I – Restauración del paisaje y manejo de cuencas hidrográficas

La primera revolución industrial originada en Gran Bretaña en Siglo XVIII, marcó un parteaguas en las formas de producción, al generar una serie de transformaciones económicas, tecnológicas y sociales jamás ocurridas en la historia hasta ese entonces, y cuyos efectos persisten hasta nuestros días (Chaves, 2004). Estos cambios se centraron fundamentalmente en un aumento de la producción de bienes en menor tiempo, proceso que requirió grandes cantidades de recursos naturales a la par que se generaban desechos que eran vertidos al ambiente. Esto condujo a que en muchas regiones industrializadas grandes extensiones de tierra degradada dominaran el territorio ocasionando la desaparición de paisajes enteros. Como consecuencia, comenzaron a vislumbrarse problemas de degradación ambiental que afectan la biodiversidad y la provisión de bienes y servicios ecosistémicos de los cuales las sociedades humanas dependen.

En un intento por resolver los cada vez más agudos problemas de degradación ambiental y paralelamente mejorar la calidad de vida de las personas; se han propuesto alternativas, destacando la restauración de ecosistemas. A grandes rasgos, la restauración busca mejorar las condiciones ecológicas de un sitio o territorio en función de múltiples objetivos. Sin embargo, desde su origen en los años treinta y su fortalecimiento como ciencia en los ochenta, esta ha venido sufriendo distintos cambios conceptuales en función a nuevas aportaciones de la ecología y ciencias afines, dando como resultado una constante búsqueda de nuevas metas y aproximaciones. Como se verá más adelante, la restauración del paisaje es una noción que considera la heterogeneidad de formas de uso de suelo y busca incluir a todos los actores involucrados en un territorio dado en pro de un objetivo; esta aproximación puede complementarse con el enfoque integrado de cuencas para establecer procesos de gestión combinada a favor de un adecuado manejo de recursos naturales y mantenimiento y/o recuperación de servicios ecosistémicos de un territorio dado. Por ello, el objeto de este capítulo es describir brevemente como ha sido el desarrollo del concepto de restauración del paisaje y

como el manejo integrado de cuencas puede complementar las metas de la restauración.

1.1 Una aproximación a la restauración

La ecología de la restauración, ciencia aún en desarrollo, se consolidó en los años ochenta como una disciplina científica que aporta conocimientos para llevar a cabo el proceso de restauración ecológica; el cual en términos generales busca solucionar problemas de degradación ambiental ocasionados por la actividad humana sobre los ecosistemas. Sin embargo, desde su origen la restauración ecológica ha sufrido una serie de transformaciones ocasionando cambios de paradigmas (Hobbs y Norton, 1996).

Las primeras aproximaciones en torno a la restauración ecológica buscaban alcanzar objetivos puntuales tales como la recuperación de la productividad, la generación de entornos de conservación, la modificación de la composición florística, entre otros (Perring *et al.*, 2015). Dichas metas se desarrollaron en torno a un enfoque de inmutabilidad y equilibrio ecológico de la naturaleza, por tanto las intervenciones realizadas eran puntuales, además en muchos casos no se consideraba el involucramiento de la sociedad en dichos proyectos. Bajo este paradigma, se desarrollaron proyectos de restauración que buscaban regresar el ecosistema alterado a un estado previo al disturbio o a un estado prístino; para ello, empleaban un ecosistema de referencia para que fungiera como modelo a replicar (Jackson, 1992; Hobbs y Norton 1996; y Dobson *et al.*, 1997).

Sin embargo, ante el avance de las investigaciones en ecología y los cambios cada vez más evidentes en la biósfera tales como el calentamiento global, reducción de la biodiversidad, degradación de los ecosistemas, entre otros; se hizo evidente que existía una dinámica difícilmente predecible, la presencia de umbrales en los ecosistemas que de modificarse producían cambios drásticos en estos; y comenzó a reconocerse el rol que juega la sociedad y la economía en el manejo y restauración de los mismos.

Ante este panorama, el paradigma de inmutabilidad y equilibrio ecológico perdió vigencia y comenzó a transformarse paulatinamente incorporando nuevos conceptos ecológicos tales como: umbrales y estados alternativos (Suding *et al.*, 2004), dinámicas de sucesión de la vegetación (Pickett *et al.*, 2009), invasión de especies (Vilá e Ibañez, 2011), dinámica de disturbios (Calderón *et al.*, 2012), consideraciones genéticas para restaurar (Bozzano, *et al.*, 2014), efectos de prioridad y resistencia de la diversidad en el ensamble de las comunidades (Viana *et al.*, 2016).

Ante esta transformación, la restauración comenzó a perseguir otra clase de metas, tales como la recuperación de la estructura y función del ecosistema para asegurar o mejorar el aprovisionamiento de los servicios ecosistémicos, superar umbrales ecológicos indeseados, entre otros; pero bajo una visión de cambio continuo en el ecosistema a escala de paisaje, considerando a la sociedad como eje para efectuar la restauración.

Esta nueva aproximación de restauración se desarrolló a partir de la definición que propuso la SERI (Society for Ecological Restoration International) en 2004; la cual define a la restauración ecológica como el proceso de ayudar al restablecimiento de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido, para hacerlo se busca retornarlo a su trayectoria histórica al iniciar o facilitar la reanudación de procesos (y funciones) ecológicos. Dicho acercamiento es utilizado por diversos autores en la materia, destacando a Vargas, (2007), Barrera *et al.* (2010), Little y Lara (2010), Rey (2012), Ugalde *et al.* (2014), Molales y Revere (2014), Perring *et al.* (2015) y Armenteras y Vargas (2016); entre otros.

En términos generales, cualquier proyecto de restauración se desarrolla en un contexto de incertidumbre, ya que al ser un proceso de asistencia no es posible controlar todos los fenómenos que operan en el ecosistema, por tanto es importante tomar en cuenta la posibilidad de no lograr los objetivos planteados inicialmente, esto implica reconocer la existencia de estados alternativos a los cuales los ecosistemas puedan virar (Bradshaw, 1997).

En el futuro, se espera que la restauración tienda a permitir objetivos múltiples que van desde la conservación de la biodiversidad hasta la recuperación de funciones ecosistémicas, enfatizando la dimensión social, incluyendo las motivaciones y metas de ésta en un entorno de entendimiento ecológico profundo y mayor capacidad tecnológica y de gobernanza, esperando que las intervenciones de restauración se apliquen a gran escala (Perring *et al.*, 2015), es decir en paisajes.

Abordar la restauración desde la escala de paisaje es necesario para conocer e integrar los procesos que ocurren en un territorio, por ejemplo procesos ecológicos y antrópicos (Perring *et al.*, 2015), en especial cuando las metas de la restauración no solo se enfocan al restablecimiento o recuperación de un ecosistema, si no que buscan la integración de sistemas restaurados a una matriz del paisaje altamente compleja, compuesta por distintos parches y corredores de vegetación, cuyos procesos ecológicos pueden variar según las condiciones ambientales y de manejo a las que estén expuestos.

1.2 La restauración del paisaje

El paisaje puede entenderse como un espacio geográfico definido por el observador que de manera subjetiva estratifica, codifica o selecciona componentes particulares de aquello observado, poniendo límites y filtrando objetos de manera arbitraria sobre una extensión de espacio y tiempo establecida por sí mismo (Burgos *et al.*, 2015), es decir, un paisaje puede ser clasificado con base en distintos atributos, por ejemplo: estructurales (como la cantidad y configuración de la vegetación), de hábitat de especies particulares, por atributos funcionales (Lindenmayer *et al.*, 2008); o bien geográficos (unidades de paisaje físico-geográficos); es en esta última perspectiva donde puede incluirse a las cuencas hidrográficas (Cotler y Priego, 2004).

Esta última perspectiva, donde el paisaje geográfico puede ser abordado como una cuenca hidrográfica merece especial atención, ya que aborda a la cuenca como un sistema complejo donde la caracterización del paisaje se realiza

empleando unidades ambientales físico-geográficas homogéneas, esto es especialmente útil, ya que brinda una visión integradora de la naturaleza al otorgar igual peso a todos los geocomponentes, abordando así a la cuenca como un todo (Cotler y Priego, 2004).

En términos de restauración, el enfoque geográfico-cuenca resulta especialmente relevante, ya que permite diseñar estrategias considerando no solo restaurar en un sitio en específico, sino toda la unidad ambiental en la que este se encuentra inmerso, mientras considera los procesos que ocurren en dicho territorio.

Esta aproximación facilita la implementación de las acciones de restauración en base a diversos objetivos, por ejemplo Sánchez *et al.*, (2005) propuso dos formas de implementar acciones para la restauración del paisaje: la primera se refiere a la naturalización, que abarca la recuperación escénica del ecosistema; mientras que la segunda, el re-funcionamiento, corresponde a la recuperación de los procesos inherentes al ecosistema yendo más allá de la mera percepción estética. El re-funcionamiento del paisaje puede lograrse por medio de la conectividad ecológica o funcional, la cual es entendida como la capacidad del territorio para permitir los desplazamientos de los organismos entre los parches con recursos (Gurrutxaga y Lozano, 2007).

Melo *et al.* (2013) propusieron una aproximación en torno a los procesos que afectan al ecosistema a escala de paisaje causando que este pierda funcionalidad. Dichos autores exponen que, un ecosistema en su trayectoria histórica original bajo distintos esquemas de manejo puede virar hacia estados alternos con distintos grados de degradación y niveles de complejidad estructural y biológica. Por ejemplo: a) se puede comenzar con un paisaje natural con poca intervención humana que conserva buena cobertura, presta servicios y es resiliente; b) bajo un esquema de uso e intervención moderada este paisaje puede transformarse en un paisaje funcional, el cual tiene menor cobertura y conectividad pero aún presta servicios; c) si esta tendencia de uso continúa acentuándose, el panorama cambiará a un paisaje degradado con escasa cobertura, alta fragmentación y poca conectividad, situación en la cual existe el riesgo de que el

ecosistema cruce un umbral bajo el cual deja de proveer servicios. Si este paisaje quiere ser recuperado deben de efectuarse acciones de restauración e inversión de recursos económicos y políticos para recuperar su funcionalidad.

En términos generales, la restauración da la oportunidad de satisfacer diversos objetivos ya que reconoce la multifuncionalidad del territorio en base a esta se posibilita el desarrollo de múltiples usos de suelo que en conjunto conforman el paisaje de interés. Esto necesariamente implica reconocer la coexistencia de usos múltiples del suelo, tales como actividades productivas, zonas de conservación y de aporte de servicios ecosistémicos, a la par que se restauran procesos funciones de interés (Jarchow y Liebman, 2011; Potschin y Haines-Young, 2011 y Schindler *et al.*, 2014).

Actualmente, una estrategia de restauración del paisaje que se emplea con mayor frecuencia es la recuperación de paisajes forestales. Esta estrategia tiene el objeto de restituir la funcionalidad ecológica en zonas degradadas a la par que se mejora el bienestar humano (García y González, 2017). Maginnis *et al.* (2014) proponen una serie de puntos para la restauración de este tipo de paisajes:

- 1) Restaurar paisajes enteros y no sitios individuales.
- 2) Buscar restaurar la funcionalidad a escala de paisaje con el objeto de mejorarlo para convertirlo en un hábitat rico, resistente y resiliente.
- 3) Considerar beneficios múltiples, esto implica generar bienes y servicios ecosistémicos.
- 4) Considerar una amplia gama de estrategias técnicas para la restauración.
- 5) Incluir a los actores locales en el diseño y ejecución de la restauración.
- 6) Adaptarse a condiciones sociales, económicas y ecológicas locales.
- 7) Emplear un enfoque de gestión adaptativa.
- 8) Evitar la reducción forestal preexistente.

Una parte esencial en la restauración funcional del paisaje es la búsqueda de la conectividad, ya que permite la conservación y restauración de ecosistemas por medio del empleo de corredores biológicos, los cuales básicamente consisten en sitios entrelazados que proveen hábitat temporal o permanente a ciertos grupos

taxonómicos de interés. Dichos corredores permiten a las especies desplazarse a través de una matriz de ambientes cambiantes, mejorando así flujo genético de las poblaciones involucradas y reduciendo el efecto de la fragmentación y el aislamiento de hábitats (Roever *et al.*, 2013; y Gálvez, 2002). Por ejemplo, en paisajes agrícolas conformados por tierras de cultivo, vegetación espontánea y vegetación de límites (linderos y riberas), la conectividad ecológica es brindada principalmente por el adecuado manejo de la vegetación limítrofe repercutiendo positivamente en especies silvestres de fauna, ya que en ella encuentran alimento, refugio, zonas de reproducción y corredores de desplazamiento (Gurrutxaga y Lozano, 2007).

Muchas veces el paisaje a restaurar presenta múltiples usos de suelo como zonas forestales sanas, sitios degradados, tierras agrícolas, de pastoreo, etcétera; en estos casos la meta de la restauración es mejorar el funcionamiento del paisaje al complementar los usos de la tierra ya existentes, en pro de obtener un paisaje heterogéneo (Maginnis *et al.*, 2014) sin comprometer la sostenibilidad del componente social que ahí persiste. En este sentido mejorar el funcionamiento del paisaje involucra generar conectividad ecológica, reestablecer procesos intrínsecos del ecosistema (Sánchez *et al.*, 2005), a la par que se recuperan bienes, servicios ecosistémicos, biodiversidad y resiliencia en un contexto donde se contemplan los diversos usos de suelo del territorio. Los principios anteriores constituyen en conjunto, un enfoque emprendedor y dinámico que permite adaptar las estrategias de restauración a medida que la sociedad cambia o surgen nuevas metas. En el siguiente apartado se define brevemente el enfoque de cuencas y como este puede apoyar al proceso de restauración del paisaje.

1.3 Manejo integrado de cuencas hidrográficas y restauración

Geográficamente, una cuenca hidrográfica es un espacio natural delimitado por un parteaguas donde el agua fluye hacia un único punto de salida (Carabias y Landa, 2008). La cuenca puede ser entendida como un socioecosistema donde los sistemas naturales se vinculan e interactúan de manera dinámica e

interdependiente con uno o más sistemas sociales (Duarte, 2006); a la par que proveen de bienes y servicios ecosistémicos de los cuales depende la sociedad humana y los mismos ecosistemas (Cotler, 2010).

En esencia, el manejo integrado de cuencas busca lograr un adecuado aprovechamiento de los recursos naturales a la par que propicia una mejora en la calidad de vida, en el desarrollo socioeconómico y calidad ambiental (Gregersen *et al.*, 2007). Para ello, el manejo de dicho territorio implica abordar la complejidad de las problemáticas ambientales por medio de la vinculación de distintas disciplinas, generando así un marco interdisciplinario donde se puedan tomar decisiones partiendo de un análisis integrado de la estructura y funcionamiento de la cuenca, relacionándolos en todo momento con aspectos políticos, económicos y sociales (Paré y Gerez, 2012).

Desde este enfoque las cuencas pueden ser abordadas simultáneamente de dos maneras: a) en función de la escala geográfica y, b) por su dinámica hidrológica (Burgos *et al.*, 2015). La primera consiste en un orden jerárquico donde la cuenca principal anida a otras unidades territoriales más pequeñas (cuenca, subcuenca, microcuenca y unidad de escurrimiento). La segunda consiste en unidades espaciales diferenciadas por la dinámica del agua, dichos territorios se conocen como zonas funcionales (Cotler y Caire, 2009; Garrido *et al.*, 2010), cada una de las tres zonas son distintivas unas de otras, se describen a continuación (Garrido *et al.*, 2010). 1) La zona funcional alta, se encuentra en la parte superior de la cuenca donde el relieve es montañoso, presenta corrientes de primer y segundo orden, su función es captar e infiltrar el agua, dando origen a corrientes incipientes que alimentan a los cauces cuenca abajo. 2) La zona funcional media es una zona de transición ubicada en la parte intermedia de la cuenca, donde el relieve tiene menos pendiente y por tanto se permite la integración de los cauces para formar ríos y cuerpos de agua, su función es transportar y almacenar agua y los nutrientes que acarrea con esta. 3) Finalmente, la zona funcional baja se encuentra en los sitios con menor altimetría de la cuenca y presenta baja pendiente, esta zona integra la red hidrográfica y con ello el agua y nutrientes que tributan las zonas superiores,

su función es recibir agua y desalojarla a otra cuenca o al mar, en esta zona ocurren procesos de sedimentación enriqueciendo así valles y sitios inundables.

El enfoque de cuencas hidrográficas considera una visión integral del territorio, perspectiva desde la cual se pueden identificar diversas problemáticas, predecir consecuencias y poder realizar acciones de gestión y manejo (Cotler y Caire, 2009). Dichas acciones de manejo pueden agruparse en el aprovechamiento, conservación y restauración de los recursos naturales. El aprovechamiento se refiere a la explotación, uso de los bienes y servicios ecosistémicos que generan los ecosistemas identificados en la cuenca; la conservación consiste en la protección/preservación de espacios y procesos que mantienen la estructura y funcionalidad de la cuenca; y por último, la restauración aborda la recuperación de espacios y procesos que se han perdido en la cuenca por diversas índoles y que afectan a su adecuado funcionamiento (Cotler y Caire, 2009).

La perspectiva que plantea el manejo de cuencas se conjuga armónicamente con el enfoque de restauración del paisaje mencionada anteriormente (Cotler y Priego, 2004), ambos enfoques buscan abordar al territorio y los procesos que ahí ocurren de manera integral. Por ejemplo, el enfoque de cuencas brinda la posibilidad de emplear el agua como un indicador ambiental indirecto de diversos procesos que ocurren en la cuenca. Esto es debido a que el agua fluye por gravedad de las zonas altas a las bajas, atravesando en su camino diversos usos de suelo (con distintas formas de manejo) y durante su escurrimiento por la cuenca va cambiando sus propiedades fisicoquímicas y su disponibilidad; es por ello que el agua, es un excelente indicador ambiental indirecto sobre las acciones de manejo efectuadas cuenca arriba (Gregersen *et al.*, 2007). De esta manera, la posibilidad de monitorear acciones de manejo y restauración se vuelve factible a escala de paisaje, ya que este puede subdividirse en cuencas, microcuenas o unidades de escurrimiento, o bien identificar paisajes dentro de una cuenca, pudiendo así evaluar una porción del territorio por medio del agua que circula en la red hidrográfica. De esta forma se pueden gestionar y efectuar las acciones de conservación, aprovechamiento y restauración que requiera la cuenca.

Asimismo, el enfoque de cuencas permite subdividir jerárquicamente una cuenca (subcuenca, microcuenca y unidad de escurrimiento) tantas veces como sea necesario hasta obtener un nivel adecuado de ejecución de propuestas (Maass y Cotler, 2007). Esto facilita la planificación de las acciones de restauración a diferentes escalas espaciales, permitiendo la ejecución de dichas acciones en sitios puntuales que en conjunto constituyan un proyecto de restauración a escala de paisaje que coadyuve al mejoramiento del funcionamiento de la cuenca.

Del mismo modo, considera a la cuenca como la unidad básica para el análisis y planificación, ya que es un territorio bien definido que puede emplearse para delimitar un ecosistema, donde pueden coexistir múltiples usos de suelo (Maass y Cotler, 2007). Esto permite identificar claramente cuándo y dónde ejecutar acciones de restauración en la cuenca considerando variables abióticas, bióticas, sociales y económicas, que revelan la vocación natural de la cuenca (Francisco, 2000) y buscan el mejoramiento o mantenimiento de su funcionalidad hídrica (Garrido *et al.*, 2010).

Otro aspecto que el manejo integrado de cuencas puede aportar a la restauración es el involucramiento de la sociedad en la toma de decisiones de manera organizada. Ya que el objetivo primordial del enfoque de cuencas es mejorar el bienestar humano y ambiental por medio de una adecuada planificación y manejo de los recursos naturales a corto, mediano y largo plazo (Francisco, 2000; Cotler y Pineda, 2008). De esta manera la restauración del paisaje puede ser diseñada e implementada por los propios habitantes, promoviendo la cohesión social y empoderamiento del territorio.

Este enfoque brinda la posibilidad de predecir consecuencias ante los distintos escenarios de manejo por medio de la elaboración de modelos ambientales hidrológicos; punto crucial para la toma de decisiones en cuanto al aprovechamiento, conservación y restauración (Maass y Cotler, 2007). De esta manera, la posibilidad de comparar cuencas, y por ende paisajes, en aspectos socioeconómicos y ambientales se vuelve factible.

1.4 Consideraciones finales

Los aspectos antes descritos constituyen una aproximación en torno a cómo el enfoque de cuencas puede contribuir a lograr las metas de la restauración del paisaje e incluso ir más allá, ya que se consideran procesos ecológicos y aspectos socioeconómicos integrados en un territorio. Por ello, el conjugar ambos enfoques puede constituir un acercamiento que coadyuve a la planeación y manejo de los recursos naturales de un territorio a corto mediano y largo plazo.

Capítulo II: Identificación y caracterización de sistemas agroforestales en el paisaje agrícola de la microcuenca Buenavista

2.1 Introducción

La agricultura moderna actúa como un detonante de procesos que impactan negativamente a los ecosistemas. Los efectos más conocidos son la degradación del suelo, contaminación del agua, pérdida de biodiversidad, y fragmentación del paisaje, entre otros (Restrepo *et al.*, 2000; Altieri *et al.*, 2005; López *et al.*, 2010). Dichos procesos generalmente desembocan en problemas ambientales que afectan de forma negativa y paulatina a la sociedad humana y a los ecosistemas.

A nivel de cuenca las actividades agrícolas efectuadas en zonas no aptas o bajo un esquema de manejo inadecuado pueden agravar aún más dichos procesos, las consecuencias se evidencian sobre todo en las zonas bajas afectando principalmente la calidad de los cuerpos de agua por arrastre y deposición de sedimentos (Aguilar, 1995; Flores *et al.*, 2013). La expansión de la agricultura en un territorio puede llegar a tal magnitud al punto que el paisaje sea categorizado como totalmente agrícola, debido a que la vegetación natural que originalmente se establecía es diezmada hasta perder su capacidad de sustentar biodiversidad y de proveer servicios ecosistémicos, a causa de disturbios, reducción de superficie y conectividad (Melo *et al.*, 2013).

Esta situación supone un conflicto ya que, o se producen alimentos y capital económico por medio de las actividades agrícolas, o se conservan los recursos naturales y la biodiversidad (Machado y Campos, 2008). En un intento de solucionar esta situación se han formulado diversas alternativas que pueden categorizarse en dos grandes grupos (Restrepo *et al.*, 2000): 1) innovaciones tecnológicas, tales como la agricultura protegida y de precisión, organismos genéticamente modificados, sistemas de riego eficientes, fertilizantes de liberación lenta, control biológico de plagas, entre otros; y 2) esquemas de manejo alternativos como el uso

de abonos orgánicos, arado de conservación, rotación y asociación de cultivos, y empleo de sistemas agroforestales; siendo estos últimos de especial interés por sus múltiples beneficios económicos, agronómicos y ecológicos.

Los Sistemas Agro-Forestales (SAF) se definen como las formas de uso y manejo de los recursos naturales, en los cuales los árboles y arbustos son empleados en asociación con cultivos agrícolas y con animales en un arreglo espacial y cronológico (López, 2007). Se destacan por su capacidad de cumplir múltiples objetivos, pues de acuerdo a su composición de especies y estructura espacial permiten diversificar cultivos, obtener alimentos y diversos bienes útiles; además optimizan el espacio, crean microclimas, mejoran las condiciones del suelo, proveen hábitat para la biodiversidad, y favorecen la conectividad del paisaje (López, 2007; Sarandón *et al.*, 2014).

Estas múltiples ventajas colocan a los SAF no solo como estrategias productivas sostenibles, sino como potenciales estrategias de producción, conservación y restauración, en especial en cuencas con uso agrícola, ayudando al mantenimiento de la funcionalidad del territorio donde se ejecuten. Los SAF se pueden catalogar en tres categorías de acuerdo al tiempo y espacio en los cuales suceden, teniendo cada uno características distintivas:

A) Sistemas agroforestales secuenciales, mantienen una relación cronológica entre las cosechas anuales y los productos arbóreos, es decir, los cultivos anuales y las plantaciones se suceden en el tiempo, por ejemplo, el sistema de roza-tumba-quema o el sistema Taungya (Musálem, 2002 y López, 2007).

B) Sistemas agroforestales simultáneos, consisten en la siembra de cultivos anuales, árboles y actividades ganaderas de manera simultánea y continúa; incluyen árboles asociados con cultivos perennes, árboles en franjas con cultivos en callejones, huertos caseros y sistemas agrosilvopastoriles (López, 2007).

C) Sistemas de barreras vivas y cortinas rompe-viento, son plantaciones en líneas o franjas de árboles y/o arbustos en los límites de las parcelas o dentro de ella con el objeto de delimitar una propiedad y obtener productos adicionales como forraje, leña, flores, frutos, madera, plantas, etcétera, a la par que protegen a las

parcelas cultivadas contra los efectos desfavorables del viento (López, 2007). Las barreras vivas se distinguen de las cortinas rompe-viento debido a que estas últimas tienen por objeto principal proteger los cultivos (Musálem, 2002), restando importancia a los productos que puedan proveer.

Las barreras vivas, destacan entre los demás tipos de SAF debido a que en algunas regiones constituyen la forma más prevaleciente de cobertura arbórea en el paisaje agrícola (Harvey *et al.*, 2005). Prestan beneficios agronómicos como reducción de erosión y escurrimiento superficial, favorecen la formación natural de terrazas y el aumento de la fertilidad del suelo (Bravo *et al.*, 2005); en aspectos socioeconómicos sirven como fuente de alimentos, madera, forraje, leña y medicinas (Giraldo, 2003); y en cuestiones ecológicas pueden fungir como hábitat para diversas especies de flora y fauna (Harvey y Haber, 1999).

En México, existen varios casos documentados sobre la implementación, uso y existencia de barreras vivas. Moreno y Casas (2010) estudiaron estos sistemas en Tehuacán como una forma de manejo tradicional para la restauración y mantenimiento de la biodiversidad a escala de paisaje; por otro lado en la subcuenca Cointzio, Michoacán, Bravo *et al.* (2011), implementaron barreras con *Eragrostis curvula* y *Rubus* sp., para evaluar su viabilidad como estrategias de restauración de suelos, se encontraron relaciones favorables entre esta clase de sistemas y el suelo al reducir la erosión en un 70% y el escurrimiento en un 80%, aumentó la disponibilidad de agua en un 5-10% y la productividad agrícola y; Hernández *et al.* (2012), en Guanajuato, evaluaron la diferencia de rendimiento de producción de maíz en callejones (estructura similar a barreras vivas conformadas por nueve especies nativas de 10 años de edad, entre las que destacan *Prosopis laevigata* y *Eysenhardtia polystachya*, obteniendo como resultados mayor productividad de maíz donde se implementaron estos sistemas con 5.29 ton/ha comparados con el testigo de 4.0 ton/ha.

Estos sistemas de barreras vivas a nivel de cuenca pueden jugar un papel importante en el mantenimiento de las funciones hidrológicas, mitigar procesos erosivos y enlazar parches de vegetación antes aislados en el paisaje agrícola,

estableciendo así corredores biológicos capaces de albergar biodiversidad (Barnes 1999; Harvey *et al.*, 2005). La distribución espacial de las barreras, su estructura y composición son factores que pueden actuar en detrimento o en beneficio de estos procesos. Por ejemplo, la conectividad dependerá esencialmente de la composición de especies que integren las barreras; ya que si están conformadas por flora nativa es más probable que provean de hábitat y actúen como reservorios de biodiversidad (Harvey *et al.*, 2005). Asimismo, las BV pueden aportar beneficios específicos dependiendo de la ubicación de las barreras vivas en las zonas funcionales de la microcuenca, por ejemplo, en la zona alta mitigar la erosión hídrica al conformar estructuras que retengan el suelo, y en la zona media y baja estabilizar terrenos y favorecer la infiltración al mejorar la estructura del suelo.

En el paisaje agrícola de la microcuenca Buenavista, municipio de Querétaro, existen problemas de erosión hídrica sobre todo en la zona funcional alta y media (PRPC, 2010), mientras que en la zona baja ha estado ocurriendo un cambio de uso de suelo sobre tierras agrícolas debido a la urbanización y a la construcción de parques industriales. No obstante, los agricultores aún mantienen grandes extensiones de barreras vivas dentro del sistema agrícola.

El presente estudio tiene como objetivo llevar a cabo el análisis del sistema agroforestal, en forma de barreras vivas, en la microcuenca Buenavista. Para ello se identificó la distribución espacial de las barreras limítrofes y al interior de los predios, su composición de especies y los estratos arbóreos y arbustivos que conforman las barreras.

2.2 Métodos

2.2.1 Zona de estudio

La microcuenca Buenavista se ubica al norte y noroeste del municipio de Querétaro (Figura 1), forma parte de la subcuenca Río Apaseo y de la cuenca Río Laja, región hidrológica Lerma-Santiago. Comprende 14 localidades, abarca un área de 18,902.95 ha y posee una altitud de 1,989 a 2,761 msnm.

Tiene un clima templado seco con lluvias en verano Bs1 Kw(w) que se distribuye por toda la microcuenca (Según Köppen modificado por García en 1964), presenta una precipitación media anual de 549 mm, siendo los meses más lluviosos de junio a septiembre y los más secos son febrero y marzo, temperatura media anual de 18.5 °C, se presentan heladas de 20 a 40 días anuales y granizadas de 2 a 4 días anuales.

La vegetación de la microcuenca está considerada como perturbada (PRPC, 2010). Según la bibliografía se tienen reportados seis tipos de vegetación: bosque de encino (*Quercus castanea*, *Q. mexicana*, *Q. crasiifolia*), chaparral (*Quercus depressipes* y *Arctostaphylos pungens*), matorral crasicaule (*Opuntia hyptiacantha*, *Myrtillocactus geometrizans*, entre otras), matorral espinoso (*Erythrina coralloides*, *Prosopis laevigata*, *Acacia farnesiana*, *Celtis pallida*), matorral inerme-subinerme (*Eysenhardtia polystachya*, *Celtis pallida*, *Condalia mexicana*, *Acacia berlandieri*, *Rhamnus humboldtiana*) y pastizal inducido (*Cynodon dactylon*, *Rhynchelytrum repens* y *Setaria grisebachii*).

Respecto al uso de suelo, aproximadamente el 59.46% de la superficie de la microcuenca (11,240.48 ha) se encuentra cubierta por vegetación natural, mientras que 32.87% (6,215.06 ha) es agrícola, solamente 4.90% (927.65 ha) es urbano y el restante 2.77% (519.76 ha) corresponde a otros usos. Los diversos usos del suelo evidencian las actividades que ocurren en la cuenca, en esta investigación el área con uso de suelo agrícola es la de interés porque es donde se distribuyen las barreras vivas.

Según el PRPC (2010), el sistema de producción agrícola está catalogado como temporal, a excepción de la zona baja de la cuenca donde es de riego. El principal cultivo es el maíz para autoconsumo y alimentación de ganado, los rendimientos son variables entre 0.8 a 3.0 ton/ha en temporal y 8 ton/ha de riego, otros cultivos son alfalfa y frijol. El arado se realiza principalmente por tractor en aproximadamente un 60% de las unidades de producción y el resto es por tracción animal; ocasionalmente se emplean insecticidas (malatión ó palatión metílico) y herbicidas (Gesaprim + Hierbamina 2 l/ha).

Para cumplir con el objetivo de esta sección, se emplearon tres metodologías; la primera consistió en la identificación de las zonas funcionales de la microcuenca, la segunda radicó en la identificación de las barreras vivas en el paisaje agrícola, y la tercera residió en caracterizar la estructura y composición de las barreras vivas previamente identificadas. La Figura 2 ejemplifica la articulación de los tres métodos para lograr el objetivo; a continuación se describe cada una.

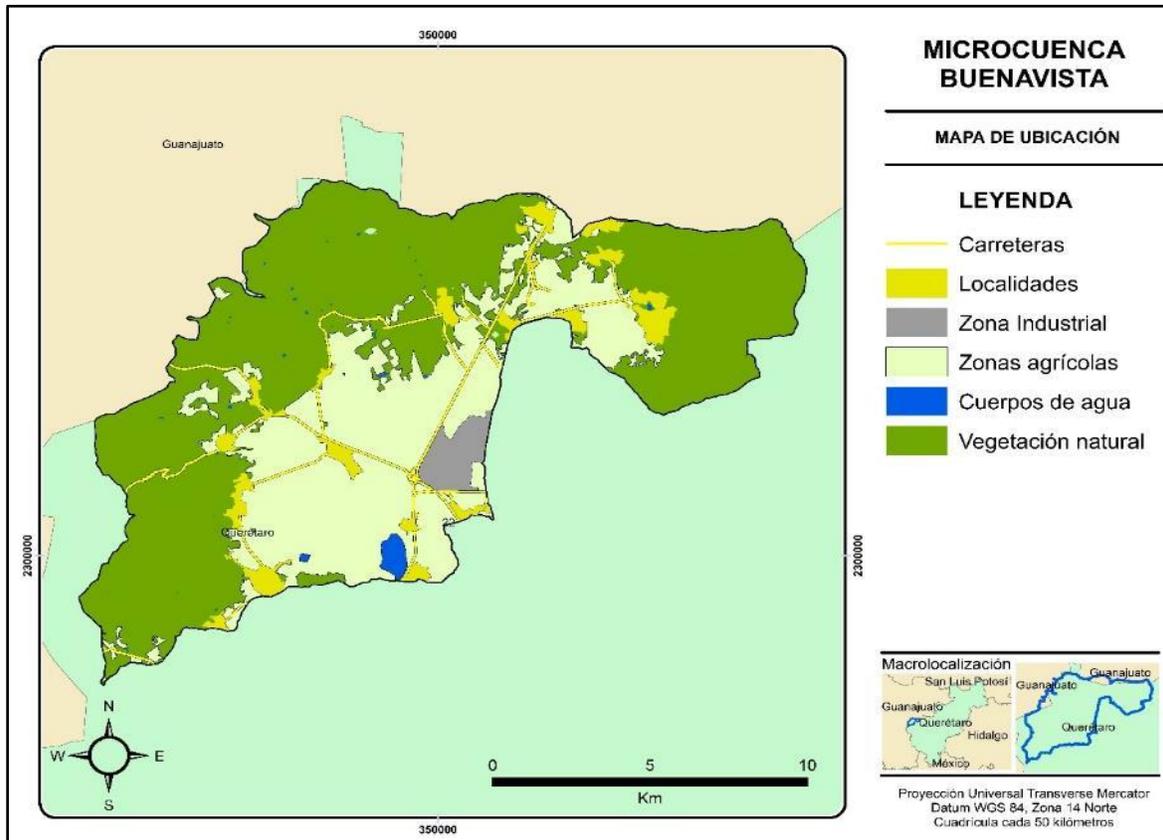


Figura 1.- Mapa de ubicación de la microcuenca Buenavista.

Fuente: INEGI.

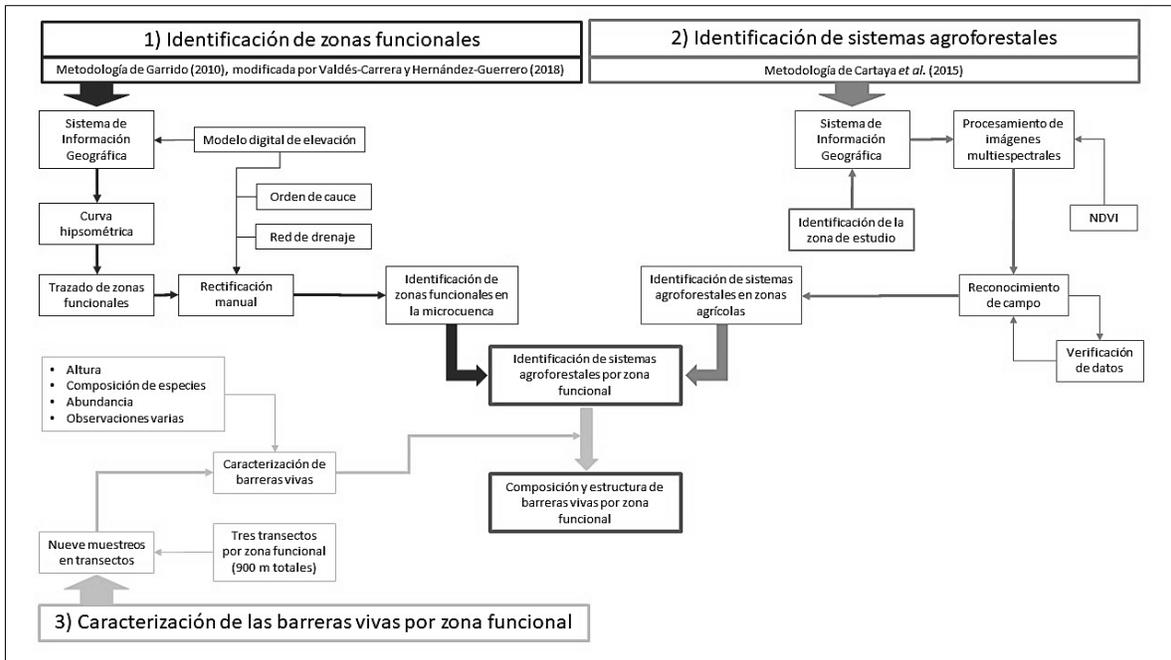


Figura 2. Diagrama metodológico para identificar y caracterizar barreras vivas.

2.2.2 Identificación de zonas funcionales de la microcuenca

Para identificar las zonas funcionales se empleó la metodología propuesta por Garrido *et al.* (2010), modificada por Valdés-Carrera y Hernández-Guerrero (2018). Para el procesado de la información se empleó el software SIG ArcMap 10.3. El proceso de elaboración se describe a continuación.

Se empleó un Modelo Digital de Elevación (MDE) de la microcuenca con resolución de 15 metros obtenido del Instituto Nacional de Estadística y Vivienda (INEGI), con ello se calculó la curva hipsométrica con curvas de nivel a 40 metros para visualizar los posibles límites de las tres zonas funcionales en base a la altimetría. Posteriormente, se creó la red de drenaje de la microcuenca a partir del MDE y se clasificó manualmente en base a los órdenes de cauce de Strahler.

El proceso de identificación de las zonas funcionales consistió en obtener las curvas de nivel a partir del MDE, las cuales se agruparon en tres secciones tomando en cuenta el cambio visual del relieve y variación altitudinal basada en la curva hipsométrica, como resultado se obtuvieron tres zonas divididas por curvas

de nivel; posteriormente, los límites de dichas zonas se ajustaron a los cambios abruptos de relieve por medio de interpretación visual de las curvas de nivel. A continuación se re-ajustaron los límites de las zonas funcionales tomando como referencia aproximada los órdenes de cauce de la siguiente manera: primer y segundo orden para la zona alta, tercer y cuarto orden de cauce para la zona media, y quinto y sexto orden de cauce para la zona baja. Producto de este ajuste se obtuvieron las zonas funcionales de la microcuenca.

Posteriormente se identificaron los usos de suelo por zona funcional, catalogándose en: 1) vegetación natural (zonas de vegetación natural, conservada y perturbada), 2) zonas agrícolas (agricultura de temporal y de riego), 3) urbano (localidades y sitios urbanos) y 4) otros (camino, carreteras, cuerpos de agua, zonas industriales y demás usos de suelo). La información de la microcuenca Buenavista se extrajo de la base de datos del INEGI del conjunto de datos vectoriales de información tipográfica edición 2015 escala 1:50,000, carta F14-C55.

2.2.3 Identificación de las barreras vivas

Para conocer la distribución espacial de las barreras vivas en el paisaje agrícola de la microcuenca, se empleó el software ArcMap 10.3 siguiendo el método modificado de Cartaya *et al.* (2015). Los detalles del proceso del método empleado se detallan en el modelo cartográfico de la Figura 3.

Se empleó la delimitación de la microcuenca establecida por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO). La información vectorial se extrajo de la base de datos del INEGI del conjunto de datos vectoriales 2015 escala 1:50,000, carta F14-C55. Se emplearon las capas de vegetación, zonas agrícolas, localidades, carreteras y zona industrial.

La delimitación del paisaje agrícola se elaboró empleando las capas de zonas agrícolas del INEGI y la capa del Registro Agrario Nacional (RAN) del 2016; a las cuales se rectificaron los límites agrícolas por interpretación visual tomando como referencia una imagen satelital del año 2017 proporcionada por Esri,

DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, y GIS User Community. Se obtuvo una capa de todos los sitios agrícolas de la microcuenca.

Para identificar las barreras vivas se empleó la metodología propuesta por Escalante y Grande, (2014), la cual usa el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), reconociendo la actividad fotosintética de coberturas arbóreas. El NDVI combina los valores de las bandas rojo e infrarrojo cercano de las imágenes satelitales para determinar la existencia de vegetación, el índice se calculó empleando la fórmula:

$$NDVI = \frac{IRc - R}{(IRc + R)}$$

Donde *IRc* corresponde a la banda de infrarrojo cercano (B-8), y *R* a la banda del rojo (B-4).

Como insumos se emplearon las imágenes multiespectrales del satélite Sentinel II de la zona de estudio, bandas B-2 (490 nm), B-3 (560 nm), B-4 (665 nm) y B-8 (842 nm), todas con una resolución espacial de 10 m; del 16 de abril de 2016. Dicha fecha se eligió debido a que las condiciones climáticas favorecen la obtención de imágenes de calidad, las especies que conforman las barreras ya presentan actividad fotosintética, y no hay cultivos agrícolas activos que puedan interferir con el procesamiento de las imágenes. Es probable, por su fenología, que algunas especies arbóreas no sean debidamente representadas e identificadas como barreras vivas debido a que aún no presentan actividad fotosintética en la fecha en la que se obtuvieron las imágenes satelitales.

El NDVI resultante se reclasificó en intervalos iguales con valor mínimo de 0.1 y máximo de 8.3, considerando valores <0.1 corresponden a rocas y arenas, valores del 0.2 a 0.3 indican terrenos con arbustos o pasturas pobres, valores de 0.4 al 0.5 pertenecen a praderas, cultivos o forestaciones, y por último valores de 0.6 a 0.8 evidencian bosques densos y vegetación vigorosa (Romero, 2016).

Para identificar las barreras vivas en toda la microcuenca se utilizó la clasificación supervisada sobre la capa de NDVI empleando 560 puntos de control

donde existen barreras, con los cuales se crearon firmas espectrales para ejecutar la herramienta de Clasificación de Máxima Verosimilitud. Los resultados fueron transformados a polígonos y se eliminaron las zonas con uso de suelo no agrícola. Se obtuvo una capa de que mostraba únicamente las barreras vivas con actividad fotosintética en el paisaje agrícola de la microcuenca, se rectificó manualmente por interpretación visual eliminando los polígonos que no coincidían con las barreras vivas, y posteriormente agregando aquellos donde existía la cobertura deseada y no fue debidamente representada por el proceso antes descrito. Para la interpretación visual se empleó una imagen satelital del año 2017 proporcionada por Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, y GIS User Community.

Los polígonos de barreras vivas fueron suavizados para mejorar su calidad estética empleando el método de Aproximación Polinomial con Núcleo Exponencial (PAEK, por sus siglas en inglés) con tolerancia del suavizado de 30 m.

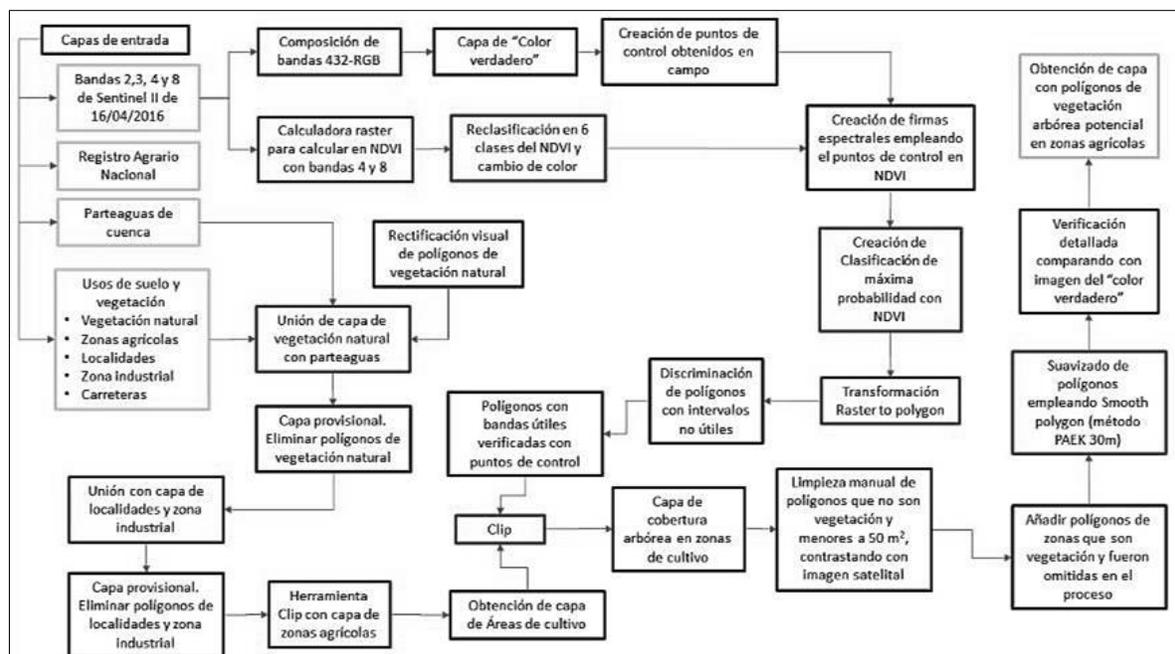


Figura 3. Modelo cartográfico para identificar la cobertura las barreras vivas.

Como último paso se realizó una verificación en campo para comprobar la existencia de dicha vegetación en los sitios reconocidos por medio del procesamiento del SIG; se realizó en septiembre de 2018 empleando un muestreo a conveniencia, según la accesibilidad de los sitios por medio de caminos y carreteras.

2.2.4 Caracterización de la composición y estratos de las barreras vivas

Para caracterizar las barreras vivas se realizaron nueve transectos de 100 m cada uno; total de 900 m lineales muestreados. La distribución de los transectos se efectuó por zona funcional, tres transectos en la zona funcional baja, tres en la zona media y tres en la zona alta.

Los transectos se realizaron paralelamente sobre las barreras vivas preexistentes, identificando la altura en metros de los ejemplares, la composición y abundancia de las especies leñosas y estratos. Para trazar los transectos se empleó un distanciómetro láser (marca Bushnell), y para altura se empleó un flexómetro metálico estándar. La colecta de datos se realizó en febrero del 2018. La elección de los sitios para trazar los transectos fue de acuerdo a la previa identificación de las barreras vivas en el paisaje agrícola y las zonas funcionales donde se encuentran; asimismo se consideró la cercanía a caminos y carreteras que facilitarían la colecta de datos (Figura 4).

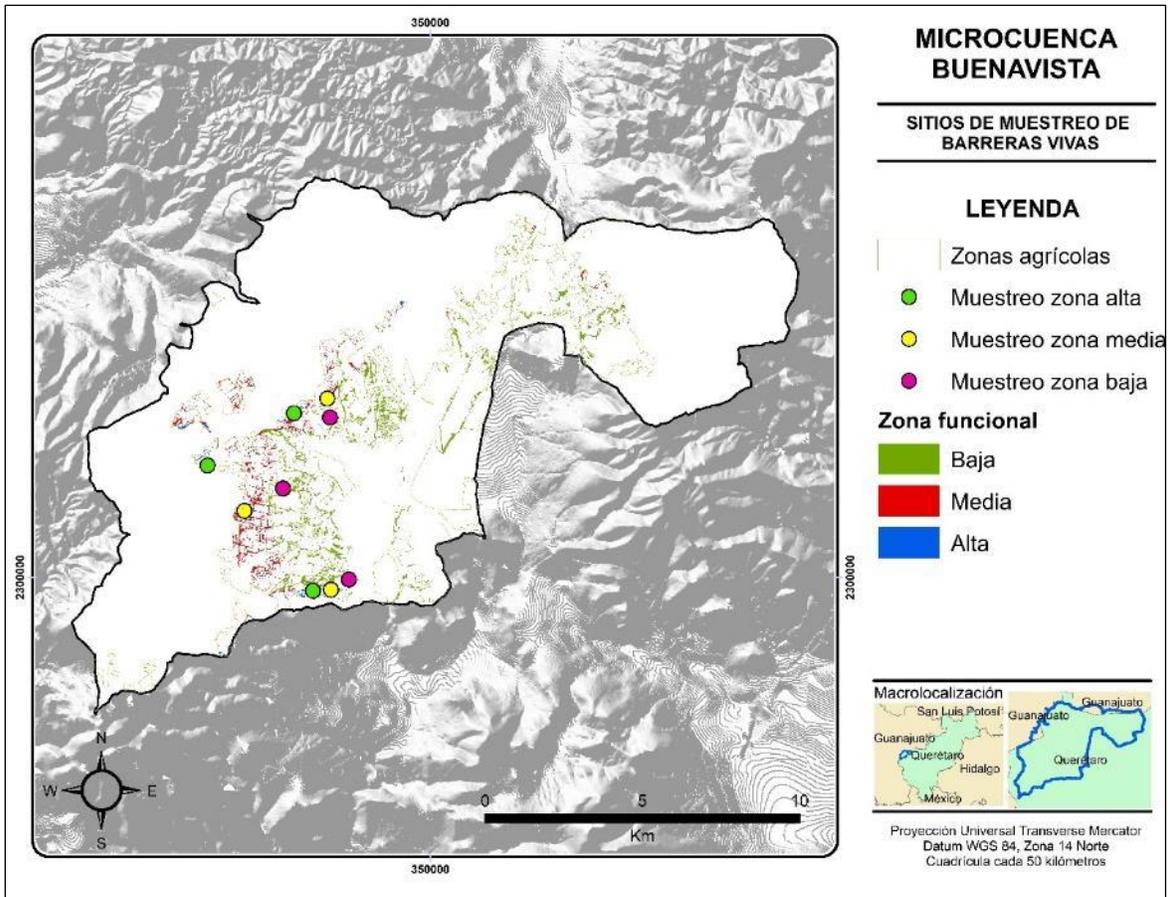


Figura 4. Sitios de muestreo para caracterizar las barreras vivas de la microcuenca.

Fuente: elaboración propia basada en información de INEGI, 2013.

2.3 Resultados

2.3.1 Zonas funcionales de la microcuenca Buenavista

Se identificaron las tres zonas funcionales de la microcuenca; la zona alta se distribuye en la parte extrema oeste, norte y este, a una altitud aproximada entre los 2,180 a 2,761 msnm abarcando una superficie de 10,102.36 ha (53.44%). La zona media se distribuye en una franja con dirección norte y noreste, a una altitud aproximada entre los 2,100 a 2,180 msnm, abarcando una superficie de 3,393.73 ha (17.95%). Por último, la zona baja se localiza en las zonas sur, centro y noreste de la microcuenca a una altitud aproximada de 1,989 a 2,100 msnm, abarcando una superficie de 5,406.85 ha (28.60%); (Figuras 5 y 6).

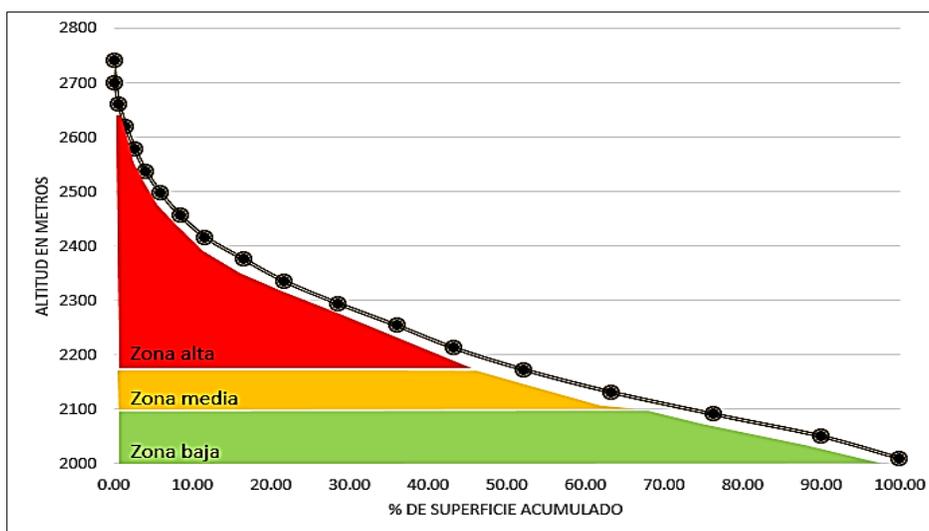


Figura 5.- Distribución altimétrica de las zonas funcionales de la microcuenca.

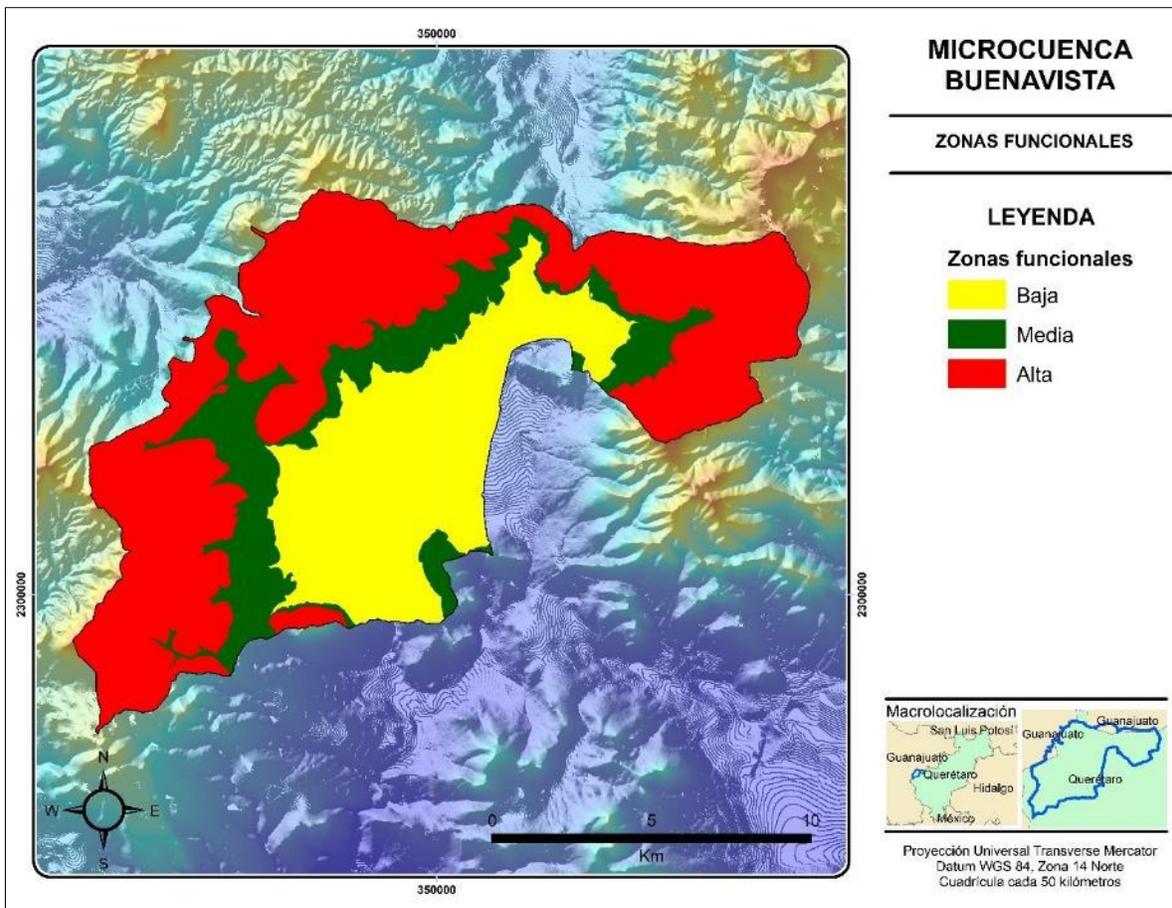


Figura 6.- Zonas funcionales de la microcuenca.

Fuente: elaboración propia basada en información de INEGI, 2013.

En cuanto al paisaje agrícola, se encontró que abarca el 32.87% (6,215.06 ha) del total de la microcuenca, distribuyéndose principalmente en la zona funcional baja donde 68.45% es agrícola (4,254.27 ha), seguido de la zona media con 25.74% (1,599.87 ha), y finalmente la zona alta donde 3.57% es agrícola (360.9 ha) (Figura 7 y Tabla 1).

Tabla 1.- Uso de suelo por zona funcional de la microcuenca Buenavista.

Uso de suelo	Zona Alta		Zona Media		Zona Baja	
	Hectáreas	%	Hectáreas	%	Hectáreas	%
Vegetación natural	9,501	94	1,342.5	40	397	7
Agrícola	361	4	1,560	47	4,254	79
Urbano	227	2	439	13	262	5
Otros	13.5	0.4	13	0.4	494	9
Total	10,102		3,394		5,407	

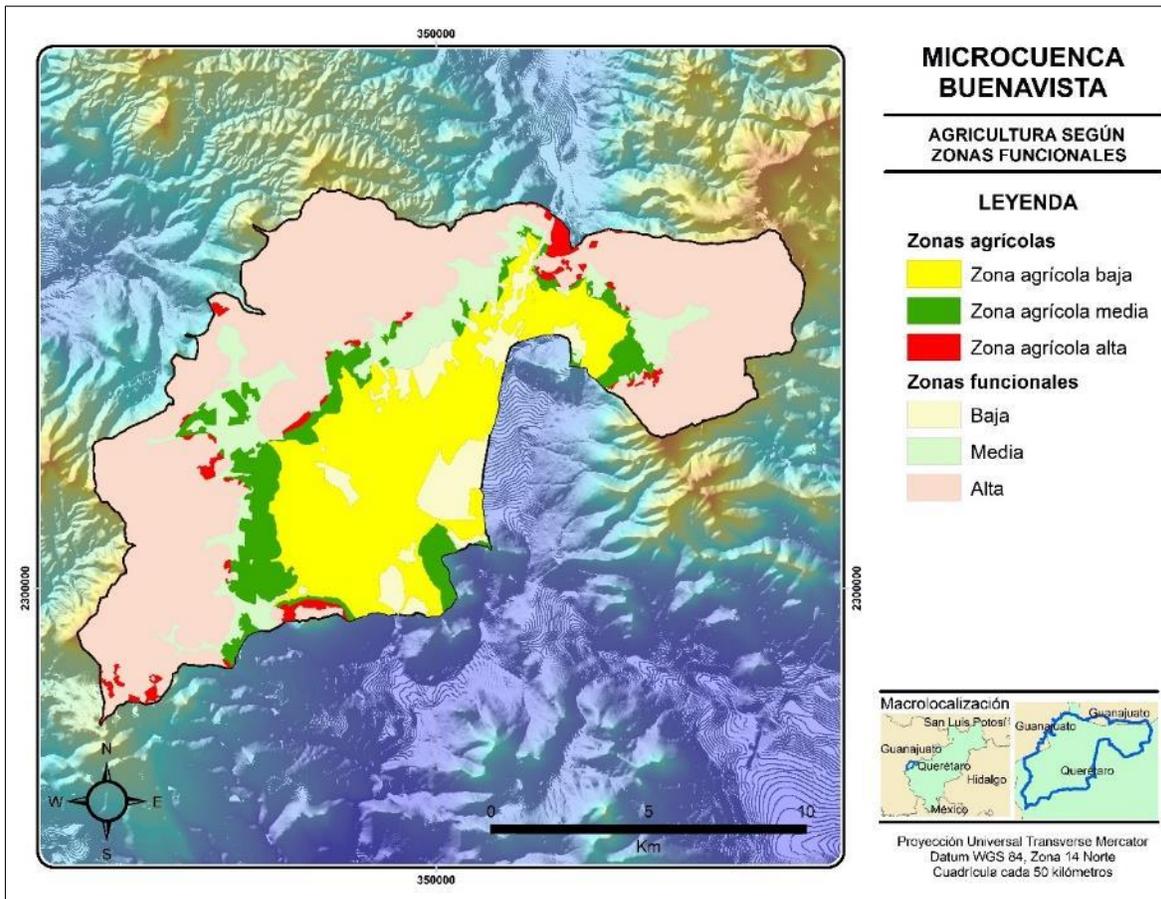


Figura 7.- Zonas agrícolas por zona funcional de la microcuenca.

Fuente: elaboración propia basada en información de INEGI, 2013.

2.3.2 Distribución de barreras vivas en el paisaje agrícola

Se encontró que dentro del paisaje agrícola de la microcuenca 6,215 ha; aproximadamente 559 ha (8.99%) son barreras vivas, incluyendo áreas agrícolas que no están registradas en el RAN y fueron incluidas manualmente al análisis (Figura 8).

Estas barreras vivas suponen formas de cobertura arbórea que se distribuyen dentro de las zonas agrícolas en límites de caminos, carreteras y predios, así como al interior de estos últimos en bordes de terrazas y en traslape con cauces naturales de agua.

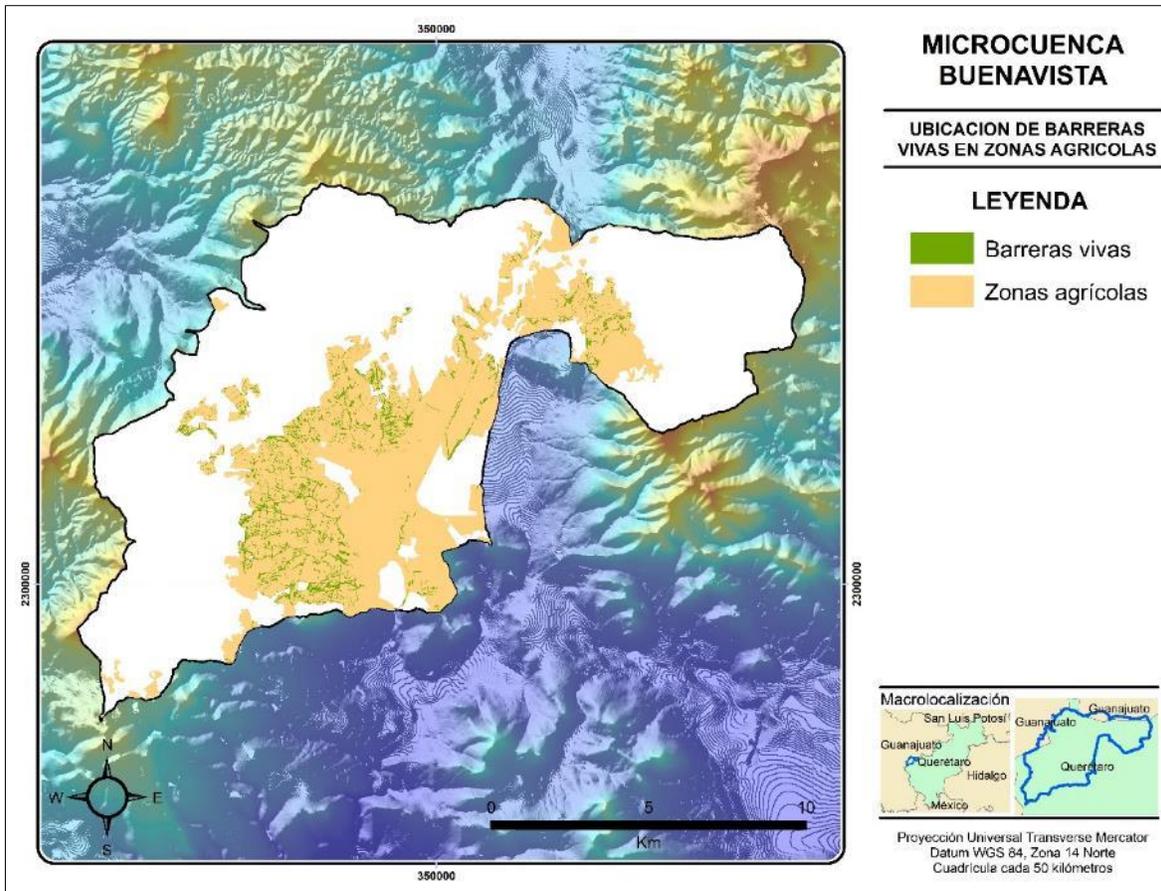


Figura 8.- Vegetación identificada como barreras vivas en zonas agrícolas.

Fuente: elaboración propia basada en información de INEGI, 2013.

La distribución por zona funcional de la superficie de estas barreras fue mayor en la zona baja con 66%, seguida de la zona funcional media con 29.35%, y la zona alta con 4.21%. La actual distribución de las barreras vivas se debe a su coexistencia con los sitios agrícolas, siendo así las zonas altas sitios que no favorecen la presencia de estos sistemas productivos por su elevada pendiente y baja disponibilidad de agua, situación contraria en las zonas media y baja que sí presentan características que favorecen la agricultura y por ende a las barreras vivas (Tabla 2 y Figura 9).

Tabla 2.- Superficie de barreras vivas en el paisaje agrícola de la microcuenca.

Zona funcional	Área (ha)	Porcentaje
Alta	23.58	4.21 %
Media	164.02	29.35 %
Baja	371.21	66.42 %
Total	558.81	

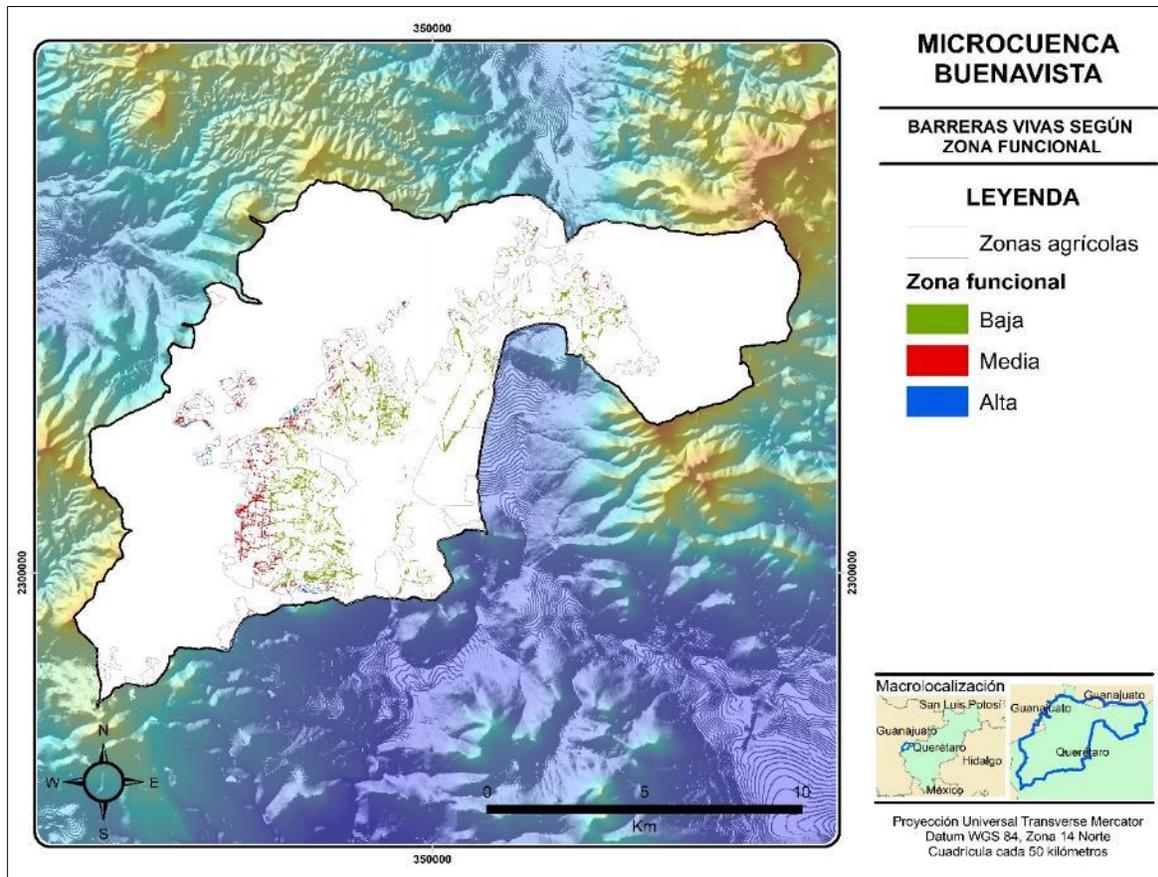


Figura 9.- Barreras vivas identificadas por zona funcional en el paisaje agrícola.

Fuente: elaboración propia basada en información de INEGI, 2013.

2.3.3 Composición de especies y estratos de las barreras vivas

En los sitios muestreados se encontró un total de 21 especies, pertenecientes a 14 familias. Del total de especies, 19 son nativas, 3 domesticadas (*Opuntia* sp., *Agave salmiana* y *Juglans regia*) y 2 introducidas (*Schinus molle* y *Melia azedarach*); no se encontraron especies incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2010. Los estratos que componen las barreras vivas son principalmente arbóreos (10 especies) y arbustivos (9 especies), y en menor medida, herbáceas (2 especies) conforme al listado en orden alfabético (Tabla 3).

Tabla 3.- Especies encontradas en las barreras vivas en la microcuenca.
Familias en orden alfabético.

Familia	Especie	Nombre común	Estrato		
			Arbóreo	Arbustivo	Herbáceo
Amaranthaceae	<i>Iresine schaffneri</i>	Pie de Paloma			
Anacardiaceae	<i>Schinus molle</i>	Pirul			
Asparagaceae	<i>Agave salmiana</i>	Agave			
Burseraceae	<i>Bursera fagaroides</i>	Palo Xixiote			
Cactaceae	<i>Cylindropuntia imbricata</i>	Cardón			
	<i>Myrtillocactus geometrizans</i>	Garambullo			
	<i>Opuntia</i> sp.	Nopal			
Cannabaceae	<i>Celtis pallida</i>	Granjeno			
Convolvulaceae	<i>Ipomoea murucoides</i>	Casahuate			
Euphorbiaceae	<i>Croton ciliatoglandulifer</i>	Canelilla			
	<i>Jatropha dioica</i>	Sangregado			
Fabaceae	<i>Acacia farnesiana</i>	Huizache			
	<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Varaduz			
	<i>Lysiloma microphylla</i>	Tepehuaje			
	<i>Mimosa</i> sp.	Gatuño			
	<i>Prosopis laevigata</i>	Mezquite			
Juglandaceae	<i>Juglans regia</i>	Nogal			
Meliaceae	<i>Melia azedarach</i>	Paraíso			
Rhamnaceae	<i>Rhamnus humboldtiana</i>	Tullidora			
Sapindaceae	<i>Dodonaea viscosa</i>	Jarilla			
Scrophulariaceae	<i>Buddleja cordata</i>	Tepozán			

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las especies que conforman las barreras por zona funcional se encontró (Tabla 4) que la zona alta se encuentran 12 especies (9 arbóreas y 3 arbustivas); la zona media alberga 16 especies (6 arbóreas, 8 arbustivas y 2 herbáceas); y la zona baja alberga tiene 10 especies (7 arbóreas y 3 arbustivas). Algunas especies que se encuentran en todas las zonas funcionales, otras que solo en dos zonas, ya sea zona alta-media, alta-baja o media-baja; asimismo especies que solamente se hallan en una zona funcional (Tabla 4).

Las especies presentes en las tres zonas funcionales fueron: *Schinus molle*, *Opuntia* sp., *Prosopis laevigata*, *Acacia farnesiana* y *Eysenhardtia polystachya*. Aquellas encontradas únicamente en las zonas funcionales alta y media fueron tres especies: *Dodonaea viscosa*, *Lysiloma microphylla* y *Rhamnus humboldtiana*. Para la zona media-baja se halló solamente una especie: *Mimosa* sp. Por último, para la zona alta-baja se reportaron tres especies: *Ipomoea murucoides*, *Buddleja cordata* y *Celtis pallida*.

Como especies exclusivas de una sola zona funcional, se encontró en la zona alta a *Junglans regia* (nogal europeo, especie introducida); en la zona media a *Melia azedarach* (introducida), *Croton ciliatoglandulifer*, *Bursera fagaroides*, *Iresine schaffneri*, *Jatropha dioica*, *Cylindropuntia imbricata* y *Myrtillocactus geometrizans*; y en la zona baja solo a *Agave salmiana* (Tabla 4).

Tabla 4.- Especies presentes en las barreras vivas según zona funcional.

Especie	Zona Funcional		
	Alta	Media	Baja
<i>Junglans regia</i>			
<i>Melia azedarach</i>			
<i>Croton ciliatoglandulifer</i>			
<i>Bursera fagaroides</i>			
<i>Iresine schaffneri</i>			
<i>Jatropha dioica</i>			
<i>Cylindropuntia imbricata</i>			
<i>Myrtillocactus geometrizans</i>			
<i>Agave salmiana</i>			
<i>Schinus molle</i>			
<i>Opuntia</i> sp.			
<i>Prosopis laevigata</i>			
<i>Acacia farnesiana</i>			
<i>Eysenhardtia polystachya</i>			
<i>Dodonaea viscosa</i>			
<i>Lysiloma microphylla</i>			
<i>Rhamnus humboldtiana</i>			
<i>Mimosa</i> sp.			
<i>Ipomoea murucoides</i>			
<i>Buddleja cordata</i>			
<i>Celtis pallida</i>			

Azul fuerte= zona alta, anaranjado zona media y rojo zona baja. Azul claro especies compartidas en las tres zonas funcionales. Verde, rosa y amarillo especies presentes en dos zonas funcionales.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.4 Abundancia de especies por zona funcional

En la zona funcional alta se encontraron 115 plantas en las barreras vivas conformadas principalmente por *E. polystachya* (43 individuos) y *L. microphylla* (22 individuos), sin embargo también estuvieron presentes *A. farnesiana* (13 individuos) y *P. laevigata* (11 individuos); este conjunto de especies conforman el 77.4% del total de organismos presentes (Figura 10). La altura media de las barreras en esta zona fue de 3.18 m., con algunos árboles entre los 1.26 m y 7.3 m (Tabla 6).

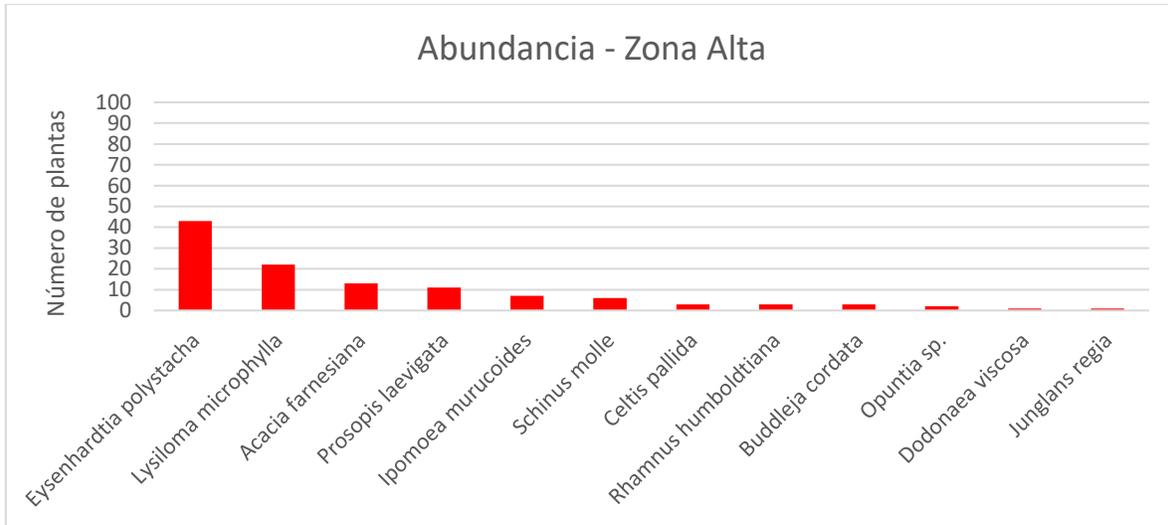


Figura 10.- Abundancia por especie en barreras vivas de la zona funcional alta.

En la zona media se hallaron 208 plantas, la especie más abundante fue *E. polystachya* (97 individuos), también estuvieron presentes pero en menor número *Opuntia sp.* (28 individuos), *A. farnesiana* (27 individuos) y *P. laevigata* (20 individuos); este conjunto conformó el 82.7% del total de organismos (Figura 11). La altura media de las barreras fue de 3.44 m., con árboles entre los 0.40 m hasta los 10.43 m (Tabla 5).

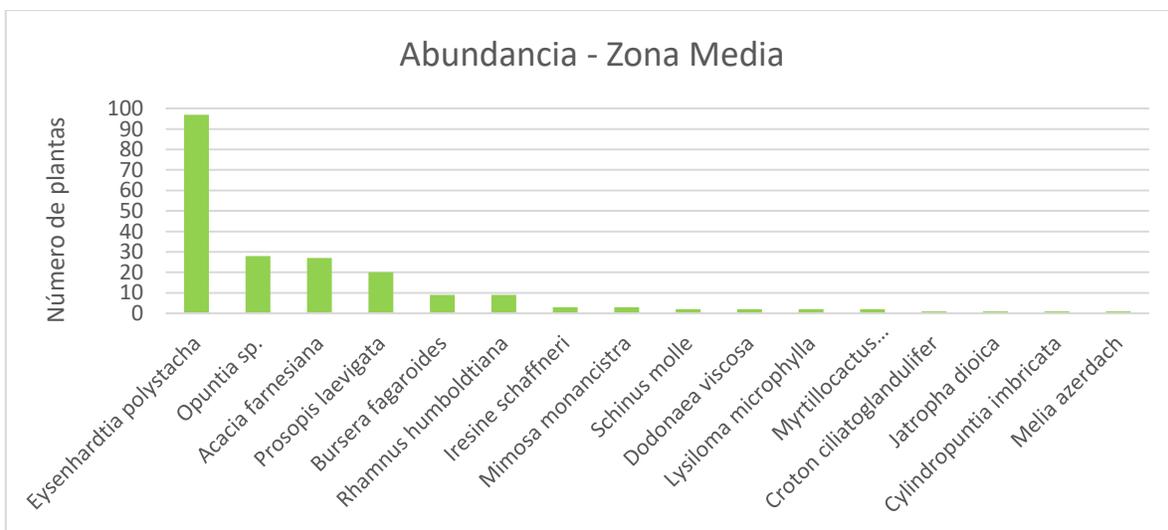


Figura 11.- Abundancia por especie en barreras vivas de la zona funcional media.

Por último, en la zona baja se hallaron 134 plantas, la especie más abundante fue *P. laevigata* (54 individuos), siguiéndole en importancia *A. salmiana* (30 individuos) y *Mimosa* sp. (17 individuos), que en conjunto conforman el 75.4% de los organismos (Figura 12). La altura media de las barreras en esta zona fue de 3.41 m., con árboles entre 1.81 m y 6.3 m (Tabla 5).

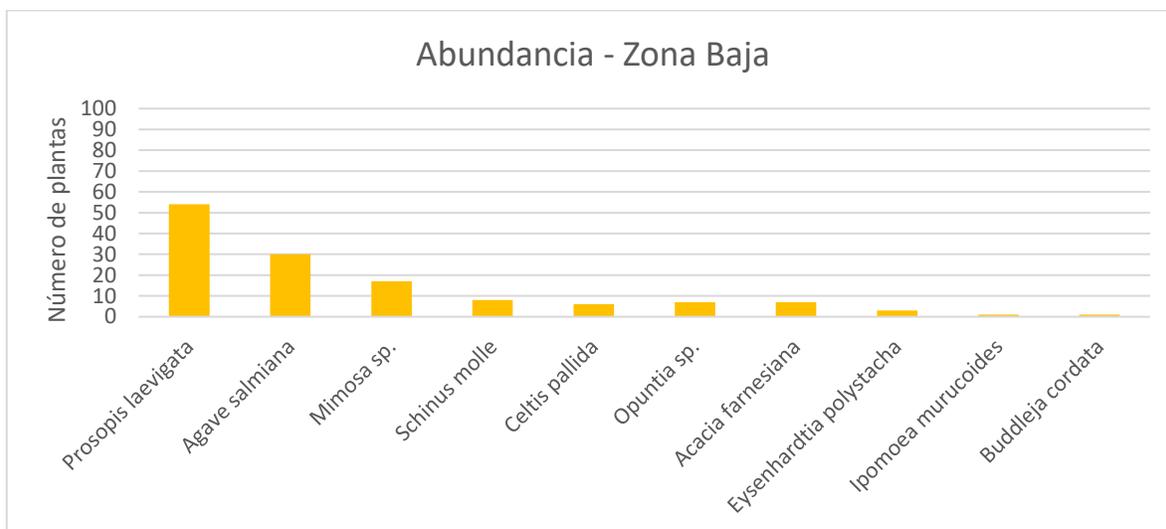


Figura 12.- Abundancia por especie en barreras vivas de la zona funcional baja.

Tabla 5.- Altura media de las barreras vivas por zona funcional (m).

	Zona Alta	Zona Media	Zona Baja
Media	3.18	3.44	3.41
Máxima	7.30	10.43	6.30
Mínima	1.26	0.40	1.81

Se muestran datos de los individuos con alturas extremas.

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Discusión

Las barreras vivas abarcan un 8.99% del paisaje agrícola de la microcuenca Buenavista, están compuestas principalmente por especies nativas arbóreas que se distribuyen sobre arroyos, cauces, límites de predios y terrazas agrícolas. Estos sistemas son la principal forma de cobertura arbórea dentro del paisaje agrícola.

La superficie que abarcan estos sistemas por zona funcional corresponde directamente con la extensión agrícola presente en cada una de las zonas. Por ejemplo, en la zona funcional alta la elevada pendiente, mayor erosión y estrés hídrico, no favorecen la agricultura y por ende existen pocas barreras vivas; en contraparte, la zona media y baja de la microcuenca, tienen mayor superficie de uso agrícola pudiendo albergar así mayor superficie de barreras.

El porcentaje de barreras vivas en el paisaje agrícola, supera lo propuesto por Gurrutxaga y Lozano (2007), autores que recomiendan destinar entre un 5-7% de la superficie agrícola a la restauración y conservación de la biodiversidad por medio del empleo de “vegetación espontánea”. Debido a que estos sistemas pueden representar sitios donde se favorezca la conectividad del paisaje para algunos grupos funcionales o *taxa* específicos de fauna (como insectos o aves); de ser así estos sistemas pueden fungir como sitios que ofrezcan hábitat temporal o permanente a especies adaptadas al agroecosistema o bien migratorias.

Las principales especies que componen las barreras vivas son *E. polystachya*, *L. microphylla*, *A. farnesiana*, *P. laeviagata*, *Mimosa* sp., *Opuntia* sp., y *A. salmiana*, entre otras. En México, se ha reportado que esta clase de sistemas difieren en su composición de acuerdo a la zona ecológica donde se encuentren y el tipo de manejo al que estén sometidos. Por ejemplo: Bravo *et al.* (2005) crearon sistemas de barreras arbustivas con zarzamoras (*Rubus* sp.) y llantas y zarzamoras en Zirahuén, Mich., en zona templada, para evaluar su influencia en la productividad agrícola y la respuesta del suelo (humedad, infiltración y erosión). Otro ejemplo es el desarrollado por Hernández *et al.* (2012) en Guanajuato creó un sistema

agroforestal en callejones empleando *Eysenhardtia polystachya*, *Lysiloma divaricata*, *Prosopis leavigata*, *Acacia pennatula*, *Acacia retinoides*, *Albizzia occidentales*, *Dodonea viscosa*, *Leucanea occidentalis* y *Casuarina equisetifolia*, para conocer su influencia en la productividad agrícola del maíz. Moreno-Calles *et al.*, (2012) estudiaron diversos sistemas agroforestales en la zona semidesértica del valle de Tehuacán, Puebla, encontrando que en esta región se emplea a *Acacia acetlensis*, *Acacia cochliacantha*, *Mimosa luisana*, *Mimosa* sp. y *Agave* sp., como barreras vivas dentro de sistemas de producción agrícola y como límites de predios. En los casos antes mencionados, destaca la presencia de especies leguminosas (Fabáceas) como parte de estos sistemas, posiblemente favorecidos por su capacidad de asociarse con bacterias fijadoras de nitrógeno capaces de mejorar la fertilidad del suelo donde se desarrollan.

En el presente estudio, se encontró que las barreras vivas se desarrollan sobre sitios perturbados, en suelos someros y presentan especies compuestas principalmente por leguminosas propias de la vegetación de matorral y de la selva baja caducifolia. Es probable que las barreras vivas presentes en las zonas funcionales alta y media sean remanentes de vegetación de selva baja caducifolia que anteriormente cubrían lo que ahora son zonas agrícolas; mientras que las barreras presentes en la zona funcional baja, sean producto de vegetación inducida y en menor medida por tolerancia de otro tipo de vegetación, por ejemplo la presencia de *A. salmiana*, indica un manejo activo de esta zona funcional, esta especie es un maguey del cual se extrae su savia conocida popularmente como aguamiel, el cual fermentado produce una bebida alcohólica conocida como pulque (Narváez *et al.*, 2016)

A nivel de la microcuenca las barreras vivas pueden estar jugando un papel importante según la zona funcional donde se encuentren. Las zonas funcionales alta y media por su elevada pendiente no son aptas para la agricultura; sin embargo, la presencia de barreras vivas en estas zonas puede estar mitigando procesos de degradación (erosión y pérdida de fertilidad del suelo) detonados por la agricultura de ladera, permitiendo así la existencia de sistemas agrícolas en estas zonas. Por ejemplo, el sistema de milpa intercalada con árboles frutales efectuado en

agricultura de ladera en los estados de Puebla, Oaxaca y el Estado de México demostró ser eficiente en la conservación del suelo, disminución del escurrimiento, aumento del almacenamiento de carbono en suelo y coadyuvar a la seguridad alimentaria (Cortes *et al.*, sin año). En el presente caso, se encontró que las especies dominantes que conforman las barreras vivas poseen características que ayudan a este proceso, por ejemplo *Eysenhardtia polystachya* es tolerante a condiciones adversas (Hernández *et al.*, 2011) y presenta nódulos fijadores de nitrógeno (Cervantes *et al.*, 2000), y *Lysiloma microphylla* es una leguminosa que, al igual que la especie anterior, se reporta como fijadora de nitrógeno (Cervantes *et al.*, 2000). Ambas especies tienen el potencial de mejorar la calidad del suelo en los sitios donde se desarrollan, pudiendo favorecer el mantenimiento de diversos servicios ecosistémicos como la captura de carbono y la regulación hídrica, sin embargo, se requiere mayor investigación para corroborar esta hipótesis.

La zona funcional baja abarca el 68.45% del paisaje agrícola de la microcuenca, por su menor pendiente favorece la productividad agrícola, las especies que conforman las barreras vivas en esta zona pueden mejorar la calidad de los suelos, por ejemplo *Mimosa* sp. (Blanke *et al.*, 2005) y *P. laevigata* (Bravo-Hollis, 1978) fungen como fijadoras de nitrógeno y la especie *A. salmiana*, ayuda a la retención de suelo en áreas de ladera (Pérez *et al.*, 2017); estas características posicionan a estas especies como potenciales restauradoras del recurso edáfico.

Se encontró que las barreras vivas están sometidas a distintos esquemas de manejo por parte de los agricultores. Se observó que la composición de las barreras es influenciada por la introducción intencional de especies útiles para las personas, como *A. salmiana* y *Opuntia* sp., y otras exóticas como *J. regia*, esta situación es evidente sobre todo en la zona funcional baja donde la actividad agrícola es mayor; en cambio, las barreras de las zonas media y alta presentan especies típicas de la vegetación natural de la región, y pocas especies domesticadas. Esta situación probablemente indique dos esquemas de manejo a los que las barreras vivas están sometidas: un manejo *activo* donde las personas modifican su composición y estructura para su beneficio y otro *pasivo* mediante la cual las barreras vivas son mantenidas con pocas o nulas intervenciones

permitiendo su desarrollo. Por tanto, se considera que las barreras vivas identificadas por medio del SIG, son sistemas agroforestales tolerados o espontáneos, como lo mencionan Gurrutxaga y Lozano (2007), ya que se establecieron en sitios donde la actividad humana era menor, (arroyos y cauces de agua naturales, límites de predios y terrazas al interior de estos) permitiendo así su desarrollo y establecimiento hasta formar los sistemas que se visualizan hoy en día.

A nivel de microcuenca, todos los sistemas de barreras vivas identificados pueden estar jugando un rol importante en el funcionamiento de dicho territorio, se ha sugerido que: 1) ayudan a estabilizar los terrenos agrícolas al mitigar los procesos erosivos y contribuyen a la formación de terrazas (Bravo *et al.*, 2005); 2) pueden mejorar la salud de los cauces y cuerpos de agua en la parte baja de la cuenca al favorecer la infiltración y disminuir la escorrentía superficial (Bravo *et al.*, 2005); 3) por su composición auxilian en el mantenimiento de la productividad agrícola, al proporcionar nutrientes al suelo por la fijación de nitrógeno; 4) posibilitan la extracción y reciclaje de nutrientes de horizontes profundos del suelo (Gliessman, 1998); 5) favorecen la infiltración de agua al subsuelo (Bravo *et al.*, 2005); 6) por su altura (alrededor de 3.5 m) pueden fungir como cortinas rompe-vientos; y 7) por la composición de especies pueden favorecer la conectividad por dispersión de fauna a través del paisaje agrícola (Harvey *et al.*, 2005). Sin embargo, los supuestos anteriores requieren investigaciones particulares que determinen el papel que juegan estos sistemas de barreras en la microcuenca Buenavista.

Aunados a los beneficios anteriormente mencionados, las barreras vivas pueden proveer de leña, madera y alimentos a los productores que los manejan (Giraldo, 2003), pudiendo mejorar la microeconomía familiar y mantener la agricultura de autoconsumo. Asimismo, pueden coadyuvar a proveer diversos servicios ecosistémicos no considerados en el presente estudio tales como: captura de carbono en el suelo, hábitat de especies, polinización, regulación climática y mejora de calidad de aire, productividad primaria, formación y conservación de suelos, y reciclaje de nutrientes, entre otros (Balvanera y Cotler, 2009).

En resumen los sistemas de barreras vivas representan un conjunto de elementos estructurales y biológicos que seguramente brindan resiliencia al paisaje, permitiendo que el agroecosistema cumpla su función de proveer alimentos y favorezca el funcionamiento del territorio. Por ello es importante que dichos sistemas se mantengan e incluso se fomenten, ya que de perderse pueden detonarse procesos erosivos que afectarían negativamente al suelo y por ende la productividad agrícola y el funcionamiento hídrico de la cuenca, entre otros.

2.5 Consideraciones finales

Se encontró que las barreras vivas abarcan un 8.99% del paisaje agrícola de la microcuenca, y que están compuestas principalmente por especies arbóreas de leguminosas nativas que se distribuyen en límites de predios, terrazas y cauces de agua naturales. Estos sistemas se supone son estructuras que retienen el suelo, mejoran su fertilidad y aportan diversos bienes a los agricultores que los manejan, contribuyendo así al funcionamiento de la microcuenca Buenavista. Están presentes en toda la microcuenca, además presentan varios estratos, con plantas en la mayoría de los casos nativas que cumplen diferentes funciones ambientales que pueden generar conectividad dentro del paisaje agrícola y fungir de albergues de especies. Se sugiere profundizar en el estudio de estos sistemas en la microcuenca, sobre todo en cuestiones de manejo y los beneficios específicos que aportan al funcionamiento de la microcuenca.

Capítulo III: Barreras vivas como potencial estrategia de restauración

3.1 Introducción

En la segunda mitad del siglo XX, la revolución agraria transformó la agricultura tradicional a un sistema de producción industrial intensivo. Estos cambios no se extendieron a todas las regiones agrícolas por igual, sino que tuvieron mayor éxito donde esta tecnología era asequible, generando así desigualdad entre los agricultores, dividiéndose entre aquellos que tenían mejores rendimientos y posición económica, y otros que continuaron con la agricultura tradicional (FAO, 2000). Bajo este escenario, la agricultura industrial se posicionó principalmente en zonas con suelos llanos y fértiles, y comenzó a expandirse transformando grandes áreas de vegetación natural a campos agrícolas, cambiando coberturas perennes por anuales; detonando así un proceso de simplificación del paisaje y acentuando gradualmente la degradación ambiental (Schulte *et al.*, 2006).

Este tipo de degradación tiene efectos negativos para el medio ambiente, ya que degrada el suelo (SEMARNAT, 2012; Flores *et al.*, 2013), contamina el agua (Aguilar, 1995), abate mantos acuíferos, disminuye la diversidad fitogenética, acentúa la pérdida de hábitat y biodiversidad, y fragmenta el paisaje. Asimismo, produce efectos adversos en la salud humana por la exposición a los agroquímicos durante su aplicación y persistencia (Restrepo *et al.*, 2000; Altieri *et al.*, 2005; López *et al.*, 2010). Estos problemas ambientales no solamente afectan a los paisajes agrícolas donde se originan, sino van a zonas lejanas resintiendo sus efectos principalmente en zonas bajas de las cuencas.

El funcionamiento de los paisajes agrícolas depende de su grado de transformación, ya que son resultado de paisajes naturales que han sido transformados, por ende, el ecosistema resultante presenta distintos grados de degradación y niveles de complejidad estructural y biológica. Esta aproximación asume que la complejidad y funcionalidad del paisaje disminuyen a la par que

aumenta la degradación causada por las actividades humanas, proceso que ocurre hasta el punto donde el paisaje ya no provee de servicios ecosistémicos (Melo *et al.*, 2013).

Es en este punto donde la restauración puede ser utilizada como una forma de recuperar la funcionalidad del paisaje de manera que busque mantener (y mejorar) la oferta de servicios ecosistémicos y beneficios socioeconómicos (Rey, 2012); por ello, la restauración del paisaje agrícola debe de considerar aspectos productivos de tal manera que permita la recuperación de servicios ecosistémicos a largo plazo (García y Lindig, 2011).

Una forma para lograrlo es el empleo de Sistemas Agro-Forestales (SAF) como una estrategia de restauración, ya que permiten proteger los remanentes de vegetación natural en las cercanías de los sitios agrícolas, aumentar la cobertura, proteger la biodiversidad, proveer hábitat para la flora y fauna, recuperar y conservar suelos, aumentar la producción de biomasa y el almacenamiento de carbono, entre otros (Vieira *et al.*, 2009; Montagnini *et al.*, 2011; Ceccon, 2013). Asimismo, estos sistemas favorecen la conectividad por medio de la integración de parches dentro de una matriz de paisaje (Sarandón *et al.*, 2014), favoreciendo la unión entre los elementos naturales (bosques, selvas, etcétera) y los sistemas de producción antrópicos (campos agrícolas, pastizales, etcétera), en especial SAF que empleen especies nativas.

Una modalidad de SAF ampliamente usada en Latinoamérica son las barreras vivas, ya que generalmente se emplean para la delimitación de predios agrícolas, a la par que ayudan a mitigar la erosión, aumentan la fertilidad del suelo, favorecen la formación natural de terrazas (Bravo *et al.*, 2005); además fungen como hábitat para la biodiversidad (Harvey y Haber, 1999) y generan conectividad ecológica (Harvey *et al.*, 2005). Incluso, estos sistemas pueden ser diseñados de tal forma de que sirvan a múltiples propósitos, es decir, que además de los beneficios antes mencionados, se seleccionen y ordenen estratégicamente las especies que las conforman para que ofrezcan productos específicos de interés, como forraje, leña, madera, medicina y alimento (Giraldo, 2003; Ceccon, 2013). Esta

situación coloca a las barreras vivas como una potencial estrategia para la recuperación de procesos ecológicos que reditúen positivamente en el paisaje agrícola, a la par que permiten el aprovechamiento de los recursos agrícolas y satisfaciendo durante el proceso necesidades sociales y económicas.

El éxito de esta clase de sistemas como estrategia de restauración funcional dependerá de la capacidad que demuestren estos sistemas de mejorar las condiciones edáficas (Bravo *et al.*, 2005), generar hábitat para la biodiversidad y brindar conectividad a través del paisaje (Harvey *et al.*, 2005), así como diversos servicios ecosistémicos. En consecuencia, es imperativo establecer y estudiar las barreras vivas *in situ*, empleando variables que provean información a corto plazo sobre cómo estos sistemas pueden estar favoreciendo procesos que reditúen positivamente, tanto en aspectos agronómicos como en procesos ecológicos en los sitios donde se ejecuten.

Como se desarrolló en el Capítulo II de esta investigación, en la microcuenca Buenavista existen barreras vivas en los límites de predios y terrazas que en conjunto abarcan un 8.99% de la superficie agrícola total que a nivel de cuenca repercuten favorablemente en términos agronómicos. Por ello, el siguiente paso es conocer el desarrollo de estos sistemas de barreras vivas en campo, tanto en cuestiones de crecimiento y fenología de sus especies como su posible influencia sobre el medio edáfico y hábitat para diversas especies.

Para ello se diseñaron e implementaron de nuevas barreras vivas en sitios específicos de la microcuenca, con el afán de evaluar (a corto plazo) la supervivencia y desarrollo de sus especies, posibles cambios en las condiciones del suelo, y el hábitat potencial que otorgan a otros organismos; aspectos que en conjunto ayuden a discernir si estos sistemas suponen una estrategia de restauración para las condiciones particulares del sitio de estudio. Por ello, el objeto de este capítulo es el diseño y establecimiento en campo de barreras vivas empleando especies nativas y frutales en la localidad La Carbonera en la microcuenca Buenavista, y evaluar su desarrollo.

3.2. Métodos

3.2.1 Área de estudio

El proyecto se desarrolló en diversos predios de la localidad La Carbonera, perteneciente al municipio de Santiago de Querétaro y a la microcuenca Buenavista. Dicha localidad fue elegida como lugar de implementación de estos sistemas por tener antecedentes exitosos y apertura social respecto al planteamiento de proyectos sustentables, que son ejecutados por el Centro Regional de Capacitación en Cuencas (CRCC) y la Maestría de Gestión Integrada de Cuencas de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ).

Para la elección de los sitios donde se implementaron las barreras se realizó una convocatoria en septiembre del 2016 a los productores de la localidad La Carbonera para invitarlos a participar en el proyecto de restauración. Dicha convocatoria fue realizada por el Centro Regional de Capacitación de Cuencas (CRCC) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ),

Como resultado de la convocatoria asistieron cinco productores, donde se les explicó la naturaleza del proyecto. Posteriormente se realizaron recorridos en diversos predios para evaluar la factibilidad de implementar las barreras vivas; los criterios de selección de los productores y predios fueron: 1) interés en mejorar las condiciones de sus predios y compromiso personal de los productores para sembrar, regar y cuidar a largo plazo las barreras; 2) aptitud de los predios para implementar las barreras vivas, considerando en esta el espacio disponible, la disponibilidad de agua y fácil acceso; y 3) aceptar el monitoreo del proyecto por académicos y alumnos.

Tres productores (con sus respectivos predios) fueron seleccionados por cumplir satisfactoriamente con los requisitos antes indicados. La ubicación exacta de las barreras vivas dentro de los predios se dejó a consideración de los productores, (Tabla 6 y Figura 13).

Tabla 6.- Productores y predios para la implementación de barreras vivas.

Propietario	Nombre de la parcela	Ubicación UTM	Superficie (ha)	Barreras vivas lineales
José Salvador	“El Venado”	0344096, 2302148	3.4	Barrera 1: 60.2 m Barrera 2: 73.8 m
Eulalia Moreno	“Eulalia”	344288, 2301831	4.84	Barrera 1: 81.5 m Barrera 2: 71.4 m
Guadalupe Sánchez	“La Era”	344716, 2301708	5.00	Barrera 1: 93 m Barrera 2: 105 m
		Total	13.24 ha	484.9 m

Fuente: Elaboración propia.

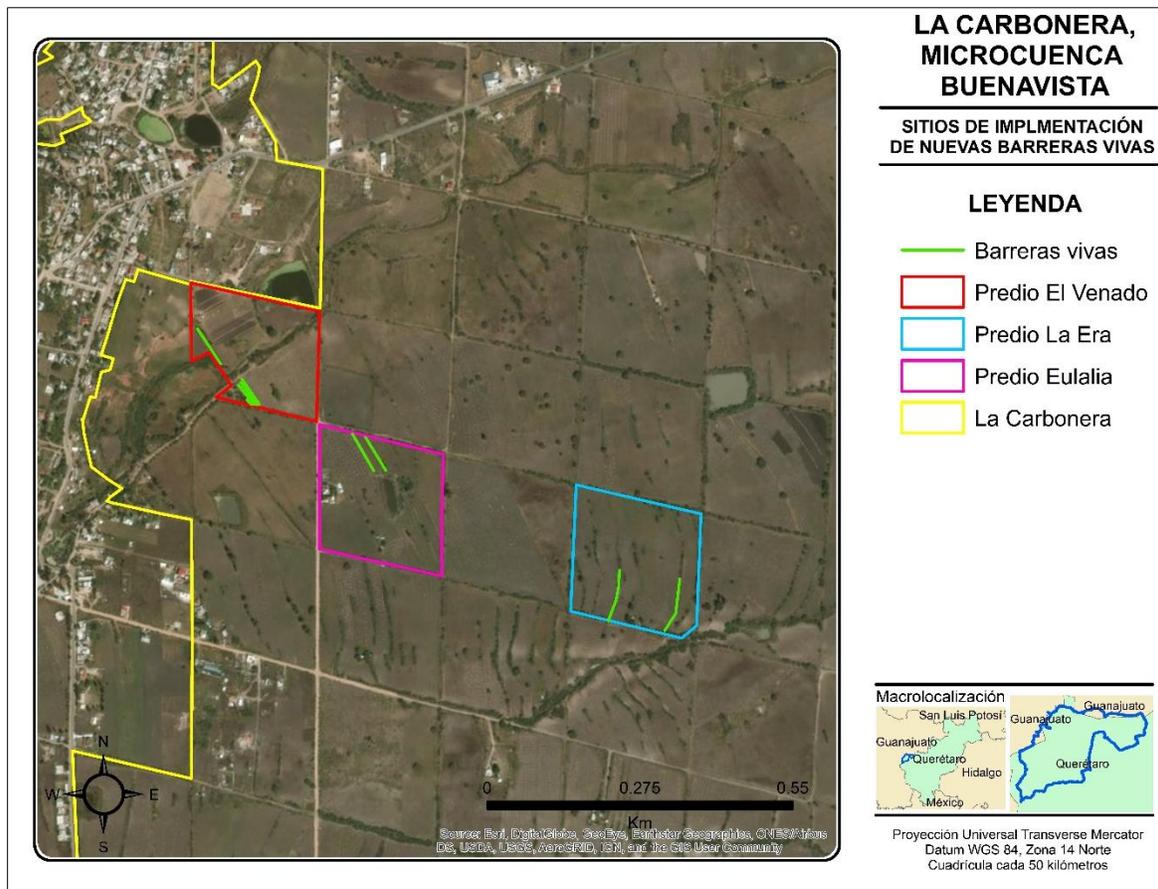


Figura 13.- Ubicación de las parcelas y sitios elegidos para la siembra de las barreras vivas.

Localidad La Carbonera, microcuenca Buenavista.

Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Diseño y establecimiento las barreras

Las especies empleadas para conformar las barreras vivas fueron seleccionadas de acuerdo a: 1) los intereses de los productores, 2) la compatibilidad ecológica de las especies y 3) la disponibilidad en viveros. Se priorizaron especies arbóreas y arbustivas nativas que sean de utilidad directa para los productores.

Las especies que se aprobaron para establecer las cercas vivas fueron cuatro: *Ficus carica* (Higo), *Erythrina coralloides* (Colorín) y *Eysenhardtia polystachya* (Varaduz) representaron al estrato arbóreo, y *Punica granatum* (Granada) al estrato arbustivo. Las especies *E. polystachya* y *E. coralloides* fueron identificadas como nativas de la microcuenca (PRPC, 2010), esta última especie se encuentra incluida en la NOM-059-SEMARNAT-2010 en la categoría de Amenazada. La elección final de estas especies se basó en sus características ecológicas para diseñar y conformar el ensamble de barrera viva, (Tabla 7).

Tabla 7.- Información biológica y ecológica de las especies empleadas en barreras.

Especie	Tipo vegetación	Forma de crecimiento	Invasividad	Función ecológica	Usos	Cuidados
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Selva baja caducifolia secundaria (Cervantes <i>et al.</i> 2000)	Arbórea o arbustiva decídua (Cervantes <i>et al.</i> 2000)	Sin datos	Fija nitrógeno (Cervantes <i>et al.</i> 2000)	Leña, forrajera (Cervantes <i>et al.</i> 2000), melífera y medicinal	Riegos iniciales y deshierbe (Cervantes <i>et al.</i> 2000)
<i>Erythrina coralloides</i>	Matorral espinoso	Arbórea, caducifolia	Sin datos	Fija nitrógeno , reduce erosión y mejora infiltración	Leña, ornamental, alimento, artesanías (PRPC,2010)	Sin datos
<i>Ficus carica</i>	Introducida	Arbórea, caducifolia	Sí, en bosque ripario (Holmes <i>et al.</i> 2014)	Reducción de erosión	Alimento, medicinal, leña	Podas de conformación
<i>Punica granatum</i>	Introducida	Arbustiva, subcaducifolia	Potencial (Castaño, 2007)	Reducción de erosión	Alimento y medicinal	Podas de conformación

Fuente: Elaboración propia.

Con los criterios anteriores se elaboró un ensamble de especies para un tramo de 25 x 7 m (175 m²) de barrera, el cual se repitió de manera lineal hasta completar la distancia total requerida, (Tabla 8 y Figura 14). Esta configuración permite aprovechar las especies de rápido crecimiento en menor tiempo, mientras que las especies del estrato arbóreo alcanzan su talla máxima.

Tabla 8.- Especies y cantidades empleadas en la conformación de las barreras vivas.

Estrato	Especie	Nombre común	Distancia	Siembra	Árboles por 25 m
Arbóreo	<i>Eysenhardtia polystacha</i>	Palo dulce	4 m	Alternado	5
	<i>Erythrina coralloides</i>	Colorín	4 m	Alternado	8
	<i>Ficus carica</i>	Higuera	2.5 m	Alternado	5
Arbustivo	<i>Punica granatum</i>	Granada	6 x 4 m	Orilla	4

Fuente: Elaboración propia.

Las plantas requeridas para sembrar barreras vivas se adquirieron de distintas fuentes, los ejemplares de *E. polystacha* se obtuvieron por donación de la SEDENA; *E. coralloides*, *F. carica* y *P. granatum* se consiguieron de un vivero autorizado de la Secretaria de Medio Ambiente de Celaya, Guanajuato.

Para la siembra se empleó la metodología de Arriaga *et al.* (1994), considerando una distancia mínima de 4 m para especies arbóreas y de 3 m para especies menores, buscando combinar dentro de la misma hilera diversas especies para aprovechar mejor el espacio y proteger eficientemente el suelo. Las cepas de siembra fueron de 40 cm de ancho, largo y profundidad. Posterior a la siembra se efectuó un riego semanal hasta la siguiente temporada lluviosa (mayo 2017).

El financiamiento para la ejecución del proyecto se obtuvo de la Fundación Río Arronte I.A.P. por medio de la gestión del CRCC. El costo de los árboles para noviembre de 2016 se muestra en Tabla 9. No se incluyen costos de viáticos.

Tabla 9.- Costo de árboles para conformación de barreras.

Especie	<i>E. coralloides</i>	<i>E. polystachya</i>	<i>F. carica</i>	<i>P. granatum</i>	Total
Cantidad	137	350	133	109	938
Costo	\$6,431.2	\$0.0	\$4,264.2	\$3,831.0	\$14,526.42

Fuente: Elaboración propia.

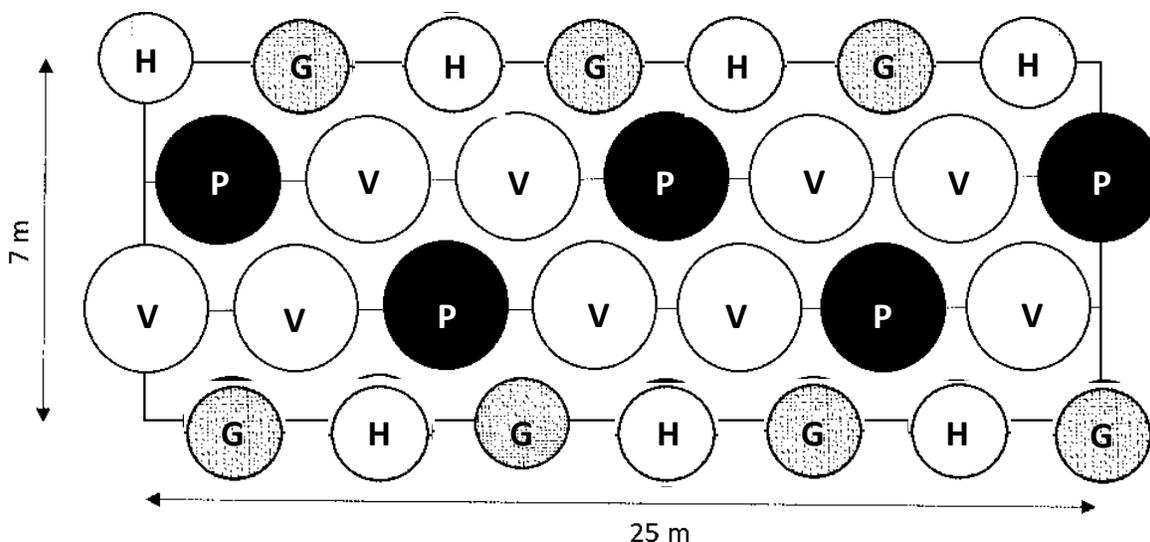


Figura 14.- Distribución espacial de los árboles en las barreras vivas.

Simbología: P -*E. coralloides*, V -*E. polystachya*, H -*F. carica* y G -*P. granatum*.

Fuente: elaboración propia.

Se sembraron 273 árboles, distribuidos en seis barreras vivas (dos por predio) empleando el ensamble de especies previamente establecido, no se emplearon fertilizantes durante el proceso de siembra ni posteriores. Del total de árboles sembrados, 80 ejemplares correspondieron a *E. coralloides*, 79 a *F. carica*, 66 a *E. polystachya* y 48 a *P. granatum*, (Tabla 10). La distribución de los árboles por predio resultó de la siguiente manera: para “El Venado” corresponden 97 árboles, a “Eulalia” 117 árboles, y “La Era” 59 árboles (no se sembró *P. granatum*).

Tabla 10.- Número de árboles sembrados por barrera viva.

Especie	El Venado		Eulalia		La Era		Total
	1	2	1	2	1	2	
<i>E. coralloides</i>	18	11	17	11	10	13	80
<i>F. carica</i>	14	14	19	10	12	10	79
<i>E. polystachya</i>	8	6	19	19	0	14	66
<i>P. granatum</i>	12	14	8	14	0	0	48
	Total						273

Fuente: Elaboración propia.

El resto de los árboles adquiridos se reservaron para reemplazar los que fueron muriendo y para conformar nuevas barreras vivas en otros sitios de la localidad (que no son de interés para esta tesis).

3.2.3 Monitoreo de las barreras

El monitoreo de las barreras vivas consistió en evaluar la supervivencia, el crecimiento, su influencia en las condiciones edáficas y la fauna diversa que albergan. Dichas secciones se desglosan a continuación.

3.2.3.1 Desarrollo de las barreras vivas

El monitoreo del crecimiento y supervivencia de los árboles de las barreras se realizó efectuando 17 mediciones, una cada mes. Se midió la altura en cm (de la base del tallo a ras del suelo hasta la yema más alta perpendicular al suelo); la cobertura en dm² (midiendo el ancho y el largo aproximado del follaje desde una perspectiva horizontal respecto al suelo, se calculó el área oval); y el diámetro del tallo en cm (midiendo a 10 cm sobre el suelo).

Con base a los datos arrojados por la altura, cobertura y tallo de cada una de las especies, se estimó el incremento absoluto por especie. Para ello se calculó la diferencia entre las dimensiones finales menos las dimensiones iniciales de cada variable.

Para conocer el desarrollo fenológico en detalle de los árboles, se calculó el crecimiento de altura, cobertura y tallo, de cada una de las especies durante el primer año en campo, reduciendo así la inconsistencia de datos por la estacionalidad climática y fenología de las especies, ya que todos los organismos empleados pertenecen a tipos de vegetación con marcada estacionalidad.

3.2.3.2 Evaluación de condiciones edáficas

Para evaluar las condiciones edáficas se realizaron dos muestreos, el primero con objeto de identificar el grupo de suelo donde se desarrollan las barreras vivas recién establecidas, realizando el estudio morfológico para obtener parámetros físicos y químicos de referencia; y el segundo muestreo fue superficial para identificar posibles cambios entre los sitios donde se desarrollan las barreras y los sitios de uso agrícola de temporal.

La primera toma de muestras se realizó en marzo de 2017 con la descripción de tres perfiles de edáficos en sitios con suelo desnudo y uso de suelo agrícola de temporal para identificar el grupo de suelo según la WRB 2007. La toma de muestras en campo se realizó de acuerdo a la metodología propuesta por Siebe *et al.*, (2006).

La segunda toma de muestras se realizó en febrero de 2018, colectando muestras de suelo superficial. Los sitios de muestreo se realizaron donde se implementaron nuevas barreras vivas, considerando una distancia máxima de 25 m entre donde se tomaron las muestras y las barreras vivas.

A todas las muestras de suelo colectadas se les realizaron análisis de laboratorio para identificar las siguientes variables: pH, textura (método del hidrómetro), color, carbono orgánico (método de Walkley-Black), nitrógeno total (método de micro-Kjeldahl), densidad aparente y real (para obtener porosidad). Las metodologías empleadas para los análisis físicos y químicos fueron tomadas del ISRIC (2002), (International Soil Reference and Information Centre, por sus siglas en inglés).

3.2.3.3 Observaciones de aves y fauna diversa en barreras

Para identificar las especies de aves y fauna diversa que frecuentan los sistemas de barreras vivas se realizaron observaciones focales a distancia. Se consideraron las barreras vivas tanto las recién establecidas como las preexistentes.

Para realizar las observaciones se realizaron recorridos a pie sobre varios transectos (Figura 15), que en conjunto abarcan 2,300 m lineales en los tres predios objeto de estudio. Sobre los transectos se establecieron 11 puntos fijos de avistamientos, donde se realizaban pausas para observar y registrar a los organismos avistados.

Las fotografías se tomaron empleando una cámara réflex con teleobjetivo (Sony Alpha 390, objetivo 75-300 mm). Se registró en que especie arbórea y/o

arbustiva se avistó al ejemplar. Los muestreos se realizaron en las mañanas (entre 8-9 am) por parcela una vez al mes, de marzo a diciembre de 2017. Se creó un registro fotográfico y se elaboró un listado de las especies identificadas que emplean las barreras vivas.

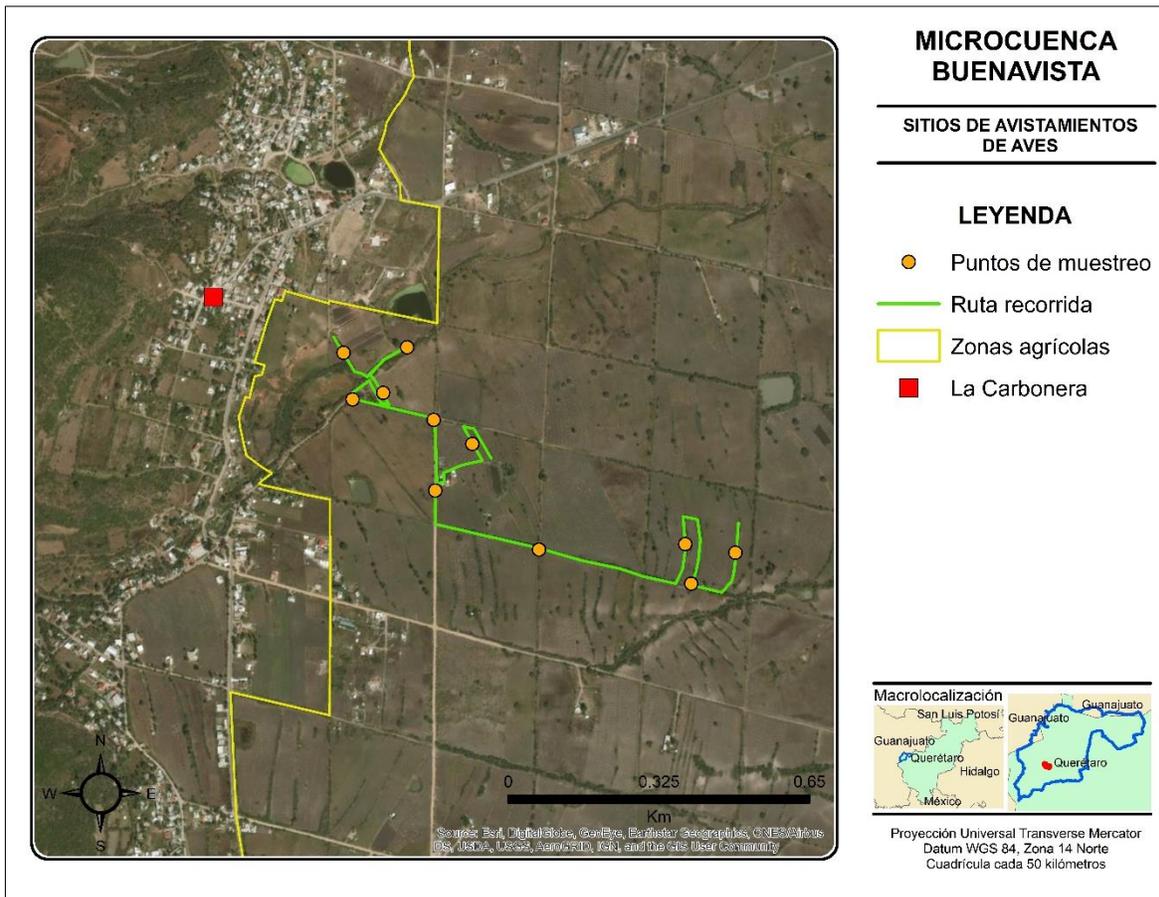


Figura 15.- Ruta y sitios de muestreo para avistamiento de aves.

La identificación de las especies de aves se realizó empleando como referencia los archivos fotográficos y los listados de especies previos para la microcuenca.

3.2.4 Percepción e historicidad de las barreras

Para conocer el origen de las barreras vivas se entrevistó a un productor de la localidad La Carbonera para conocer dos aspectos fundamentales respecto a

la historicidad del uso de la tierra y la antigüedad las barreras vivas presentes en la microcuenca. A continuación se muestran las preguntas clave que guiaron la entrevista.

¿En qué año fue el reparto de tierras? ¿Cómo fue que sucedió? ¿Hace cuánto tiempo se abrieron estas tierras de cultivo? ¿Desde hace cuánto comenzaron a usar tractor para labrar? ¿Desde hace cuánto existen las tornas en los predios? ¿Por qué mantienen los árboles en las tornas?

Las respuestas a estas preguntas se sintetizaron y sistematizaron para conocer la percepción que tiene este actor sobre el campo y las barreras vivas de la localidad, así como obtener información respecto al origen de estos sistemas en la microcuenca.

3.3 Resultados

3.3.1 Supervivencia de las barreras vivas

La supervivencia de los árboles después de 17 meses fue del 31.14%. Respecto a las especies, la que presentó mayor supervivencia fue *P. granatum*, con un 58.33% (28 plantas de 48 iniciales), *E. polystachya* con 27.27% (18 plantas de 66 iniciales), *E. coralloides* con 26.25% (21 plantas de 80 iniciales) y finalmente *F. carica* con 22.78% (18 plantas de 79 iniciales).

La supervivencia por predio fue mayor en “El Venado”, con un 44.33% (43 árboles supervivientes de 97 iniciales), seguido por “Eulalia” con un 29.91% (35 árboles de 117 iniciales), y finalmente “La Era” con un 11.86% (7 árboles de 59 iniciales). La Figura 16 muestra la supervivencia por especie y predio.

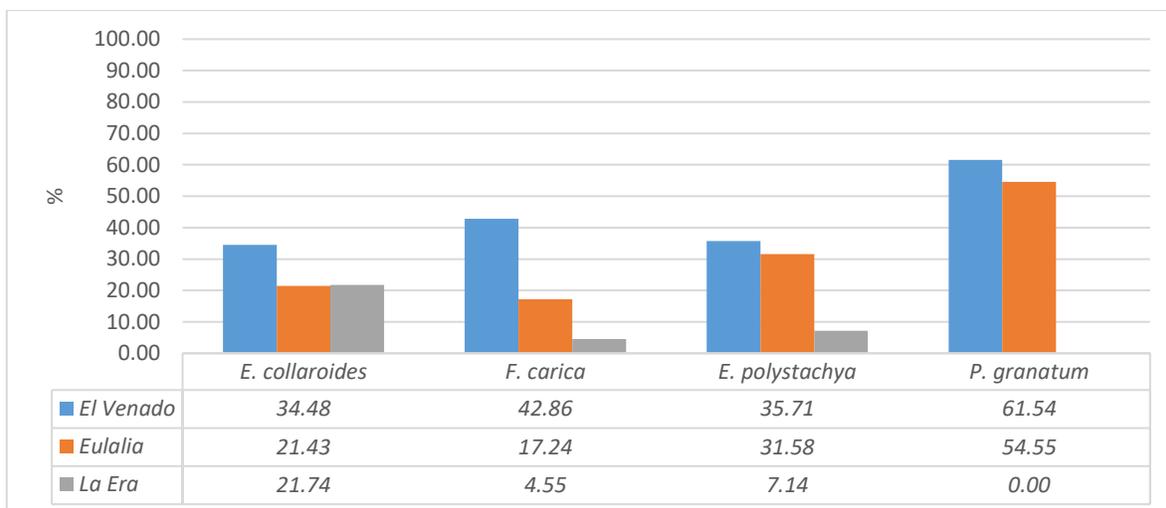


Figura 16.- Porcentaje de supervivencia de las especies por predio.

3.3.2 Comportamiento de desarrollo de las especies

En esta sección se muestra como fue el comportamiento fenológico de las especies empleadas en el sistema de barreras vivas implementado. Dicha información es útil para discutir si el ensamble propuesto es adecuado a ser empleado como estrategia de restauración para las condiciones de la microcuenca.

La primera especie, *Erythrina coralloides* mostró un comportamiento positivo respecto a las dimensiones del tallo aumentando aproximadamente 3.2 cm de diámetro (tamaño final menos el inicial); en altura tendió a decrecer considerablemente disminuyendo aproximadamente 32.5 cm al final del periodo de monitoreo; finalmente la cobertura fue variable mostrándose ausente durante los meses de diciembre a mayo, (Figura 17).

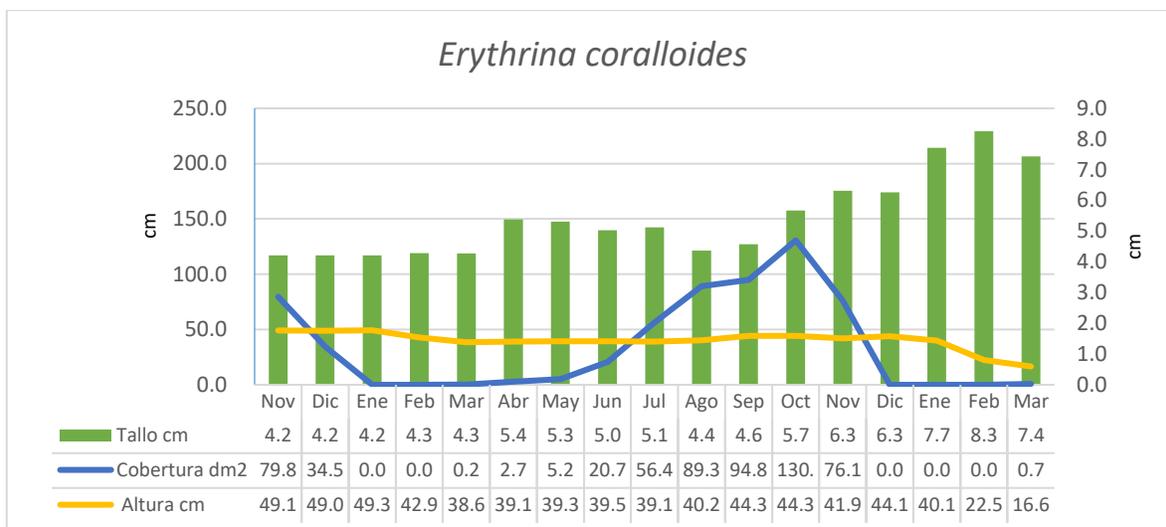


Figura 17.- Dimensiones mensuales de *E. coralloides*. Respecto a tallo, cobertura y altura, durante 17 meses de monitoreo en campo.

Al ser una especie caducifolia, el crecimiento que presentó fue estacional durante los meses lluviosos. El crecimiento se desarrolló en fases, comenzó durante el mes de abril aumentando su altura para posteriormente desarrollar cobertura y perderla completamente en diciembre. El crecimiento del perímetro del tallo se incrementó ligeramente para posteriormente decrecer en enero. Este comportamiento del tallo posiblemente esté asociado a una estrategia de almacenamiento de agua en tallo durante los meses lluviosos incrementando así su diámetro, para posteriormente aprovechar esa agua almacenada en los meses de escasez, resultando en un decrecimiento del diámetro.

La segunda especie, *Ficus carica* mostró un comportamiento de crecimiento lento y estable respecto a las dimensiones de perímetro del tallo, exceptuando el último mes de muestreo, donde decreció abruptamente, dando como resultado un decrecimiento de 0.4 cm, dicho comportamiento se atribuye a la muerte del tallo principal y a la toma de datos de nuevos tallos emergentes; respecto a la altura esta tendió a decrecer perdiendo aproximadamente 24.1 cm durante el periodo de monitoreo; finalmente la cobertura osciló a lo largo del año mostrándose ausente en los meses de diciembre a febrero, (Figura 18).

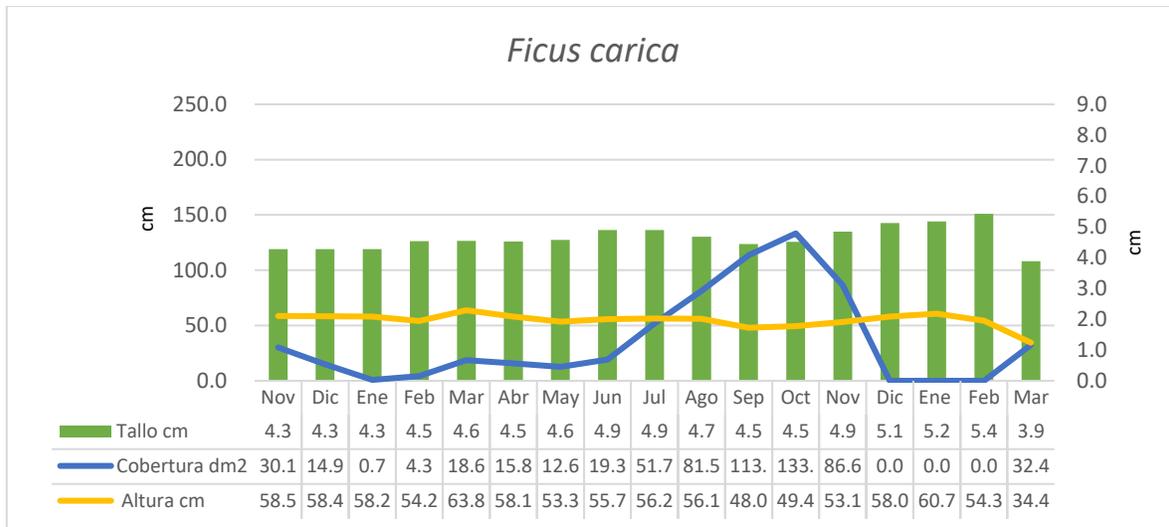


Figura 18.- Dimensiones mensuales de *F. carica*. Respecto a tallo, cobertura y altura, durante 17 meses de monitoreo en campo.

Al igual que la especie anterior, es una especie caducifolia con crecimiento en la temporada de lluvias. Se encontró que su crecimiento comienza con el desarrollo de yemas apicales en marzo provocando un aumento en la cobertura, la cual se mantiene hasta noviembre y paulatinamente va perdiendo follaje hasta culminar en diciembre.

La tercera especie, *Eysenhardtia polystachya* mostró un comportamiento positivo respecto a las dimensiones de perímetro del tallo arrojando un crecimiento medio de 3.0 cm; la altura tendió a decrecer perdiendo aproximadamente 6.6 cm; finalmente la cobertura presentó crecimiento estacional ganando 15 cm durante el periodo de monitoreo (Figura 19).

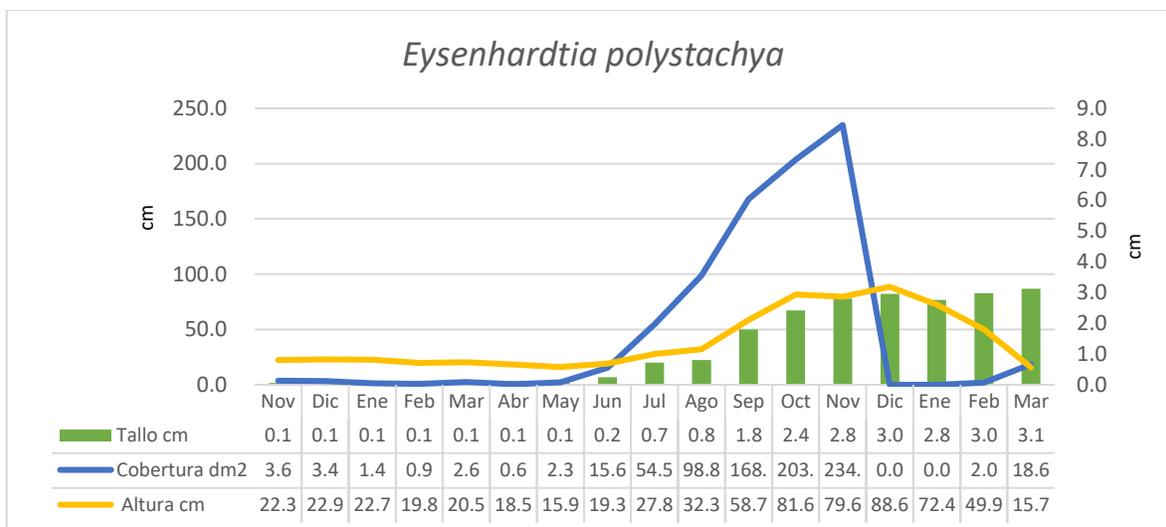


Figura 19.- Dimensiones mensuales de *E. polystachya*. Respecto a tallo, cobertura y altura, durante 17 meses de monitoreo en campo.

Al ser una especie caducifolia con crecimiento estacional, su crecimiento en altura y cobertura se dispara en el mes de junio (con el inicio de las lluvias) y cae en picada en el mes de noviembre (al final de la temporada lluviosa); el crecimiento de perímetro del tallo comienza en el mes de julio y se mantiene hasta decaer en noviembre. Durante el resto del año el crecimiento se detiene.

La cuarta especie, *Punica granatum* mostró un comportamiento relativamente estable respecto a las dimensiones del tallo; en altura, tendió a decrecer perdiendo aproximadamente 65.5 cm comparado con su tamaño original; y finalmente la cobertura osciló a lo largo del año mostrándose ausente en los meses de diciembre a febrero, (Figura 20).

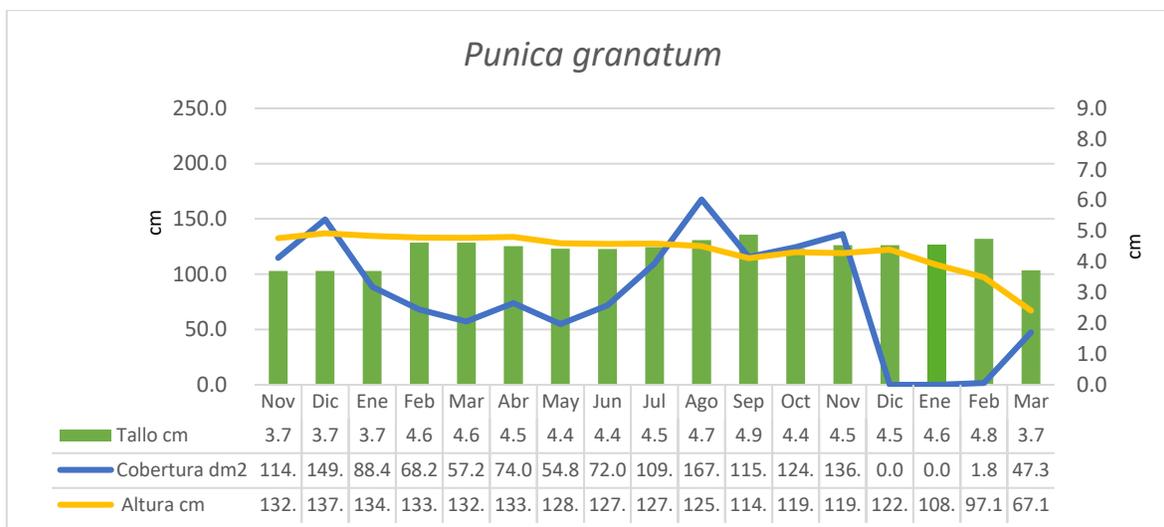


Figura 20.- Dimensiones mensuales de *P. granatum*.
Respecto a tallo, cobertura y altura, durante 17 meses de monitoreo en campo.

Al ser una especie domesticada presenta características distintivas de las otras, ya que tuvo un comportamiento brevidecidual al mantener su cobertura la mayor parte del año presentando abundantes rebrotes durante casi todo el año, exceptuando los meses de diciembre a febrero; esta conducta se reflejó en el mantenimiento relativamente constante de su altura hasta el mes de enero, donde decreció debido a heladas que se presentaron en la zona en los meses de enero a marzo. Respecto al perímetro del tallo, éste comienza su desarrollo en el mes de febrero, el cual se mantiene relativamente constante para posteriormente decrecer en el mes de marzo, posiblemente a estrés hídrico.

3.3.3 Crecimiento de las especies sembradas

El análisis de crecimiento al cabo de un año, se encontró que todas las especies perdieron altura, excepto *E. polystachya*, esto indica que probablemente es una especie apta para conformar barreras vivas de acuerdo a las condiciones ambientales de la zona (Tabla 11).

Tabla 11.- Crecimiento parcial acumulado de las especies.

Especie	Tallo (cm)		Cobertura (dm ²)		Altura (cm)	
	Media	±	Media	±	Media	±
<i>E. coralloides</i>	2.10	1.48	-3.64	2.58	-7.19	5.08
<i>F. carica</i>	0.57	0.41	56.50	39.95	-5.44	3.85
<i>E. polystachya</i>	2.74	1.94	231.34	163.59	57.27	40.50
<i>P. granatum</i>	0.84	0.59	21.57	15.25	-13.38	9.46

Se muestran valores de tallo, cobertura y altura en 12 meses de crecimiento, de noviembre de 2016 a noviembre de 2017.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al comportamiento de estas especies por variable (tallo, cobertura y altura) en un lapso de 12 meses se encontró lo siguiente.

El crecimiento de perímetro de tallo la especie *E. polystachya* mostró el mayor crecimiento con 2.74 cm (± 1.94 cm), seguido de *E. coralloides* con 2.10 cm (± 1.48 cm), luego por *P. granatum* con 0.84 cm (± 0.59 cm), y finalmente *F. carica* con 0.57 cm (± 0.41 cm).

El crecimiento de cobertura, la especie *E. polystachya* fue la que presentó mayor crecimiento, con 231.34 dm² (± 163.59 dm²), seguido de *F. carica* con 56.5 dm² (± 39.95 dm²) y *P. granatum* con 21.57 dm² (± 15.25 dm²); en contraste *E. coralloides*, presentó valores negativos -3.68dm² (± 2.58 dm²).

Por último, la única especie que presentó crecimiento en altura, fue *E. polystachya*, con 57.27 cm (± 40.5 cm). El resto de las especies presentaron valores negativos debido a que la altura se redujo por debajo del valor inicial, *F. carica* presentó -5.44 cm (± 3.85 cm), *E. coralloides* -7.19 cm (± 5.08 cm) y *P. granatum* -13.38 cm (± 9.46 cm).

3.3.4 Condiciones edáficas en sitios con barreras vivas nuevas

Según la clasificación de la WRB (2007), se encontraron tres grupos de suelo. Para el predio “El Venado” se encontraron dos grupos de suelo Cálculo Kastanozem (Ántrico Gréyico) y Cálculo Kastanozem (Ántrico, Epiarcílico, Gréyico); mientras que para el predio “Eulalia” se encontró Cálculo Vertisol (Pélico). Todos los

suelos muestreados corresponden a la zona funcional media de la microcuenca Buenavista.

La Tabla 12 muestra las diferencias de las propiedades físicas y químicas del primer horizonte de suelo entre los sitios donde se efectúa agricultura de temporal, y donde se implementaron barreras vivas. Los datos se muestran por grupo de suelo.

Tabla 12.- Diferencias físicas y químicas de grupos de suelos bajo distintos tipos de manejo.

Suelo	Sitio	pH	COT	NT	Relación	Porosidad	Textura (%)			
		H ₂ O	g/kg		C/N	%	Clasificación	Arcilla	Limo	Arena
Vertisol	Agr	7.46	4.29	0.25	17.35	51.6	Arcilloso	51	38	10
	EuBv1	7.40	8.58	0.59	14.50	57.3	Arcilloso-limoso	54	34	11
	EuBv2	7.00	8.58	0.63	13.72	55.5	Arcilloso-limoso	55	29	13
Kastanozem_1	Agr	7.70	5.46	0.27	20.14	55.5	Franco-arcilloso-arenoso	28	21	45
	VeBv1	7.51	5.85	0.71	8.21	58.6	Arcilloso	45	32	22
Kastanozem_2	Agr	7.30	10.14	0.84	12.05	56.9	Franco-arcilloso	26	49	22
	VeBv2	7.30	9.36	0.82	11.47	56.7	Arcilloso	48	34	15

COT= Carbono Orgánico Total; NT= Nitrógeno Total.

Suelo: Vertisol= Cálculo Vertisol (Pélico); Kastanozem_1= Cálculo Kastanozem (Ántrico Gréyico); Kastanozem_2= Cálculo Kastanozem (Ántrico, Epiarcílico, Gréyico).

Agr=Muestra de suelo agrícola; EuBv1=Muestra en barrera viva 1, predio Eulalia; y EuBv2= Muestra en barrera viva 2, predio Eulalia; VeBv1=Muestra en barrera viva predio, El Venado; y VeBv2= Muestra en barrera viva, predio El Venado.

Fuente: Elaboración propia.

Suelo Cálculo Vertisol (Pélico) – Predio Eulalia

Según la WRB (2007), el **Vertisol** se diferencia de otros grupos por las siguientes características de diagnóstico encontradas en campo y laboratorio: A) posee un horizonte vértico (horizonte subsuperficial arcilloso que presenta superficies pulidas, *slikensides*, y agregados en forma de cuña) que comienza dentro de los primeros 100 cm del suelo; B) tiene 30% o más de arcilla entre la superficie del suelo y el horizonte vértico en todo su espesor; y C) posee grietas que se abren y cierran periódicamente. Respecto a su calificador grupo I **Cálculo**, éste indica la presencia de un horizonte con acumulación de carbonato de cálculo ya sea en forma difusa o como concentraciones discontinuas en un 15% o más de la tierra fina, y un 5% o más de carbonatos secundarios y un espesor de 15 cm o más. Por

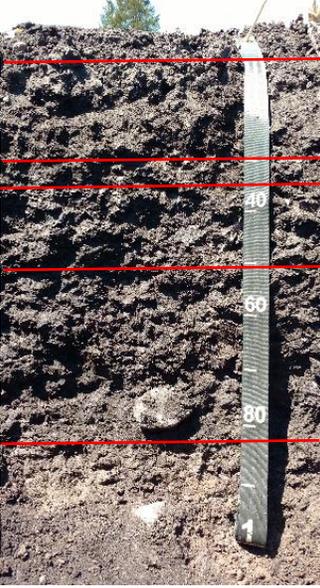
último respecto a su calificador grupo II **Pélico**, indica que en los primeros 30 cm el suelo presenta un color Munsell de 3.5 o menos de intensidad y un croma de 1.5 o menos en húmedo.

Este es un suelo desarrollado *in situ* a partir de material volcánico, cuenta con un perfil profundo, drenado, de color oscuro uniforme, con poca pedregosidad (<10%), con estructura granular gruesa en el horizonte superficial y angular en bloques muy gruesos (>50 mm) en los horizontes inferiores con *peds* de moderado desarrollo y de mediana a muy alta estabilidad, tiene presencia de formación de cuñas desde 8 a 52 cm de profundidad, posee poros tubulares muy finos a medianos, tiene presencia de raíces hasta los primeros 28 cm de suelo y de *slickensides* de los 28 cm de suelo en adelante (Tabla 13).

Este grupo de suelo presentó los siguientes resultados. En cuanto al pH se encontraron diferencias sutiles tendiendo a ser ligeramente más ácido el suelo en zonas donde se sembraron las barreras vivas. El contenido de Carbono Orgánico Total (COT) fue un 50% más en sitios donde se desarrollan barreras vivas. En los sitios donde se desarrollan las barreras vivas, se encontró que el suelo tiene entre 2.3 y 2.5 veces más nitrógeno comparado con los sitios donde se ejecuta la agricultura de temporal. Respecto a la textura el sitio agrícola presentó textura más fina que en los sitios con barreras vivas con 3 y 4% menos arcilla, entre 4 y 9% menos de limo, y 1 y 2% menos arena. La porosidad en el sitio agrícola fue menor que en los sitios que albergan barreras vivas (diferencias de 3.9 y 5.7%). Por último, respecto la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) se encontró que el sitio donde se desarrolla agricultura tiene una relación más alta (C/N de 17.3), comparado con aquellos sitios donde existen barreras vivas (C/N de 13.7 y 14.5), (Tabla 12).

En resumen, en el predio “Eulalia” existen mejores condiciones de suelo en sitios donde se desarrollan barreras vivas que en aquellos donde se practica agricultura. El suelo de las barreras vivas presenta mayor contenido de carbono (50%+), mayor contenido de nitrógeno, mayor porosidad y una relación C/N que evidencia actividad biológica más favorable.

Tabla 13.- Descripción morfológica de Vertisol.

Fotografía	Hor.	Prof. (cm)	Descripción
	Ap	0-8	Suelo color gris oscuro en húmedo (10YR 3/1), textura arcillosa, muy bajo contenido de materia orgánica (0.85%), ligeramente básico (pH-H ₂ O 7.5), estructura granular gruesa, pedregosidad (2%), pocos poros tubulares muy finos, finos y medianos, poca densidad de raíces, límite abrupto ondulado. Textura arcillosa (51% de arcillas, 38% de limos y 10% de arenas).
	Bi1	8-30	Suelo color negro en húmedo (7.5 YR 2.5/1), textura arcillosa, ligeramente básico (pH-H ₂ O 7.4), estructura en bloques muy gruesos en forma de cuña, presencia de superficies de deslizamiento (i), pedregosidad (2%), pocos poros tubulares muy finos, finos y medianos, poca densidad de raíces, límite claro suave. Textura arcillosa (50% de arcillas, 35% de limos y 12% de arenas).
	Bi2	30-35	Suelo color negro en húmedo (7.5 YR 2.5/1), textura arcillosa, neutro (pH-H ₂ O 7.1), estructura en bloques muy gruesos en forma de cuña, presencia de superficies de deslizamiento (i), pedregosidad (1%), muy pocos poros tubulares muy finos, finos y medianos, muy poca densidad de raíces, límite gradual suave. Textura arcillosa (59% de arcillas, 28% de limos y 11% de arenas).
	Bi3k	35-52	Suelo color negro en húmedo (7.5 YR 2.5/1), textura arcillosa, moderadamente básico (pH-H ₂ O 7.7), estructura en bloques agregados muy gruesa en forma de cuña, presencia de superficies de deslizamiento (i), pedregosidad (10%), muy pocos poros tubulares muy finos, finos y medianos, muy poca densidad de raíces, límite gradual suave. Contenido bajo de carbonatos. Textura arcillosa (59% de arcillas, 31% de limos y 9% de arenas).
	Bi4k	52-85	Suelo color negro grisáceo en húmedo (7.5 YR 4/1), textura arcillosa, básico (pH-H ₂ O 7.9), estructura en bloques muy gruesa en forma de cuña, presencia de superficies de deslizamiento (i), pedregosidad (10%), muy pocos poros tubulares finos y medianos, muy poca densidad de raíces, límite gradual abrupto. Contenido medio de carbonatos. Textura arcillosa (61% de arcillas, 31% de limos y 9% de arenas).
	Ck	85-100+	Suelo color negro grisáceo en húmedo (7.5 YR 4/1), textura arcillosa, moderadamente básico (pH-H ₂ O 7.9), estructura en bloques agregados muy gruesa, pedregosidad (10%), pocos poros tubulares medianos, muy poca densidad de raíces, límite abrupto. Contenido medio de carbonatos.

Fuente: Elaboración propia.

Suelo Calcic Kastanozem (Antrico, Greyíco) – Predio El Venado

Según la WRB (2007), el grupo suelo **Kastanozem** (denominado más adelante como Kastanozem_1) se diferencia de otros grupos por las siguientes características de diagnóstico encontradas en campo y laboratorio: A) posee un horizonte mólico (horizonte superficial grueso, estructurado, oscuro con alta

saturación de bases y materia orgánica) y una saturación de bases de 50% o más en todo el espesor hasta una profundidad de 100 cm de la superficie del suelo hasta la roca continua. Tiene un calificador del grupo I, **Cálcico**, indica la presencia de un horizonte con acumulación de carbonato de cálcico ya sea en forma difusa o como concentraciones discontinuas en un 15% o más de la tierra fina, y un 5% o más de carbonatos secundarios y un espesor de 15 cm o más. Por último, presenta dos calificadores del grupo II, **Ántrico** indica la presencia de un horizonte superficial moderadamente grueso de color oscuro que resulta del cultivo prolongado cumpliendo todos los requerimientos de un horizonte Mólico y muestra evidencia de disturbio humano por un piso de arado o fragmentos de cal aplicada o mezclado capas por labranza o 1.5 g/kg de P₂O₅ soluble, tiene menos del 5% de bioporos o trazas de actividad animal debajo de la profundidad arada y tiene un espesor de 20 cm o más; y **Gréyico**, indica colores Munsell con un croma de 3 o menos y un value de 3 o menos en húmedo y granos de limo o arena no revestidos sobre las caras estructurales dentro de los 5 cm de superficie del suelo mineral.

Este suelo fue desarrollado a partir de material aluvial de origen volcánico. Presenta perfil somero, bien drenado, color pardo rojizo en la parte superior y pardo en la zona inferior del perfil, seco, muy poca pedregosidad (<5%), los agregados presentaron estructura débil dispuestos en bloques sub angulares finos y gruesos, poros irregulares muy finos y finos, y presencia de raíces hasta los primeros 45 cm de suelo (Tabla 14).

Se encontraron los siguientes resultados. En cuanto a pH los sitios que albergan barreras vivas tienen un pH ligeramente más ácido. La cantidad de COT fue mayor en sitios que albergan barreras vivas (7.1%). La cantidad de nitrógeno total fue 2.6 veces mayor en los sitios con barreras comparado con los sitios agrícolas. El sitio agrícola presentó textura más gruesa que en los sitios con barreras vivas presentando 17% menos arcillas, 11% menos limos, y 23% menos arena. En cuanto a la porosidad, el sitio agrícola tiene menor (3.1%) porosidad que los sitios que albergan barreras vivas. Por último, respecto a la relación carbono/nitrógeno se encontró que el sitio donde se desarrolla agricultura anual

tiene una relación más alta (C/N de 20.1), comparado con el sitio donde existen barreras vivas (C/N de 8.21).

En resumen, para el suelo Kastanozem, se considera que existen mejores condiciones edáficas en sitios donde se desarrolla agricultura de temporal, esto es evidenciado por la baja relación C/N que se presenta en el sitio donde se establecieron las barreras vivas.

Tabla 14.- Descripción morfológica de Kastanozem_1.

Fotografía	Hor.	Prof. (cm)	Descripción
	Ap	0-20	Suelo color pardo oscuro en húmedo (7.5YR 3/2), textura franco-arcilloso-arenosa, bajo contenido de materia orgánica (1.92%), moderadamente básico (pH-H ₂ O 7.7), estructura débil en bloques sub angulares finos, pedregosidad aluvial (2%), muchos poros irregulares muy finos y finos, mucha densidad de raíces, límite claro recto. Sin presencia de carbonatos. Textura franco-arcillosa-arenosa (28% de arcillas, 21% de limos y 45% de arenas).
	Bk1	20-48	Suelo color pardo oscuro en húmedo (7.5YR 3/2), textura franca, moderadamente básico (pH-H ₂ O 7.8), estructura débil-moderada en bloques sub angulares gruesos, pedregosidad aluvial (5%), poros irregulares finos, mucha densidad de raíces, límite ondulado gradual. Contenido de carbonatos medio. Textura franca (24% de arcillas, 43% de limos y 30% de arenas).
	Bk2	48-58	Suelo color pardo en húmedo (7.5YR 4/2), textura franca, moderadamente básico (pH-H ₂ O 7.8), estructura débil en bloques sub angulares finos, pedregosidad aluvial (2%), muy pocos poros tubulares muy finos, finos y medianos, poca densidad de raíces, límite claro recto. Bajo contenido de carbonatos. Textura franca (21% de arcillas, 46% de limos y 31% de arenas).
	CR	58+	Regolito. Color pardo en húmedo (7.5YR 4/2). Presencia de motas finas de arcilla color marrón (15%).

Fuente: Elaboración propia.

Suelo Cálxico Kastanozem (Ántrico, Epiarcílico, Gréyico) – Predio El Venado

Por último, según la WRB (2007), el **Kastanozem** (denominado más adelante como Kastanozem_2) al igual que el anterior suelo: A) posee un horizonte mólico (horizonte superficial grueso, estructurado, oscuro con alta saturación de bases y materia orgánica); B) tiene un horizonte cálcico o concentraciones de carbonatos secundarios que comienzan dentro de 50 cm debajo del límite inferior del horizonte mólico y si estuviera presente, encima de una capa cementada o endurecida; y C) posee una saturación de bases de 50% o más desde la superficie

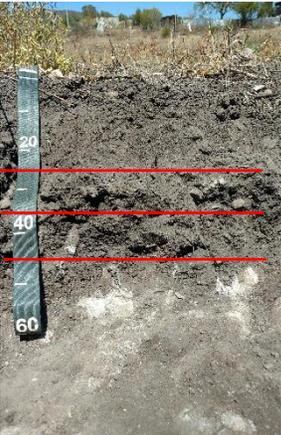
del suelo hasta el horizonte cálcico o concentración de carbonatos en todo su espesor. Tiene un calificador del grupo I **Cálcico**, el cual indica la presencia de un horizonte con acumulación de carbonato de cálcico ya sea en forma difusa o como concentraciones discontinuas en un 15% o más de la tierra fina, y un 5% o más de carbonatos secundarios y un espesor de 15 cm o más. Por último, tiene tres calificadores del grupo II **Ántrico**, indica la presencia de un horizonte superficial moderadamente grueso de color oscuro que resulta del cultivo prolongado cumpliendo todos los requerimientos de un horizonte Mólico y muestra evidencia de disturbio humano por un piso de arado o fragmentos de cal aplicada o mezclado capas por labranza o 1.5 g/kg de P_2O_5 soluble, tiene menos del 5% de poros de animales o trazas de actividad animal debajo de la profundidad arada y tiene un espesor de 20 cm o más; **Epiarcílico**, indica una textura arcillosa en una capa, de 30 cm o más de espesor, dentro de 50 cm de la superficie del suelo; y **Gréyico**, indica colores Munsell con un croma de 3 o menos y un value de 3 o menos en húmedo y granos de limo o arena no revestidos sobre las caras estructurales dentro de los 5 cm de superficie del suelo mineral.

Este suelo fue desarrollado a partir de material aluvial de origen volcánico. Presenta un perfil somero, bien drenado, color pardo oscuro en la parte superior y pardo en la zona inferior del perfil, seco, poca pedregosidad (10%), los agregados presentaron estructura moderada, dispuesta en bloque gruesos sub-angulares, peds bien formados y nítidos, con poros tubulares muy finos y finos; presencia de raíces hasta los primeros 53 cm de suelo; el contenido de arcilla aumenta conforme a la profundidad, exceptuando el regolito (Tabla 15).

Se encontraron los siguientes resultados. En cuanto al pH no se encontraron diferencias comparando los sitios agrícolas y donde se desarrollan las barreras vivas. El contenido de COT fue ligeramente mayor (0.78%) en los sitios agrícolas. La cantidad de nitrógeno fue mayor (2.39%) en sitios donde se desarrolla agricultura. Respecto a la textura, el sitio agrícola tuvo una textura más gruesa que en los sitios con barreras vivas, presentando 22% menos arcillas, 15% más limos y 7% más arenas. La porosidad entre ambos sitios no presentó diferencias (0.02%). Por último, respecto a relación carbono/nitrógeno se encontró que el sitio donde se

desarrolla agricultura anual tiene una relación ligeramente más alta (C/N de 12.05), comparado con el sitio donde existen barreras vivas (C/N de 11.47). En resumen, se considera que existen mejores condiciones edáficas en aquellos sitios donde se desarrolla agricultura de temporal, aunque con una relación de C/N es similar evidenciando buena actividad biológica en el suelo.

Tabla 15.- Descripción morfológica de Kastañozem_2.

Fotografía	Hor.	Prof. (cm)	Descripción
	Ap	0-25	Suelo color negro en húmedo (10YR 2/1), textura franca, bajo contenido de materia orgánica (2.02%), neutro (pH-H ₂ O 7.3), estructura moderada en bloques sub-angulares muy gruesa, pedregosidad aluvial (10%), muy pocos poros tubulares muy finos y finos, muy densidad de raíces, límite abrupto ondulado. Muy bajo contenido de carbonatos. Textura franco-arcillosa (26% de arcillas, 49% de limos y 22% de arenas).
	Bk1	25-35	Suelo color negro en húmedo (10YR 2/1), textura franco-arcillosa, ligeramente básico (pH-H ₂ O 7.5), estructura moderada columnar muy gruesa, pedregosidad aluvial (10%), pocos poros tubulares muy finos y finos, poca densidad de raíces, límite ondulado gradual. Muy bajo contenido de carbonatos. Textura franco-arcillosa (34% de arcillas, 42% de limos y 24% de arenas).
	Bk1w	35-45	Suelo color pardo muy oscuro en húmedo (10YR 2/2), textura franco-arcillosa, moderadamente básico (pH-H ₂ O 7.6), estructura moderada en bloques angulares gruesos, pedregosidad aluvial (10%), pocos poros tubulares muy finos, poca densidad de raíces, límite ondulado gradual. Bajo contenido de carbonatos. Textura franco arcillosa (39% de arcillas, 31% de limos y 29% de arenas).
	CRk	45+	Regolito. Color pardo muy oscuro en húmedo (10YR 2/2), moderadamente básico (pH-H ₂ O 7.7), estructura moderada gruesa en bloques angulares, pedregosidad aluvial (10%), muy pocos poros tubulares muy finos, poca densidad de raíces. Presencia de nódulos de carbonatos de 3 mm (7%). El horizonte termina con regolitos mezclados con suelo y finalmente regolito. Medio contenido de carbonatos.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5 Observaciones de aves y fauna diversa

Como producto de las observaciones en campo en las barreras nuevas y preexistentes, se encontraron en total ocho especies de aves, una especie de anfibio, una especie de reptil y cinco de insectos (no clasificados taxonómicamente). Ninguna de estas especies se encontró registrada en la NOM-059-SEMARNAT-2010.

En las barreras vivas sembradas se encontraron chapulines (orden Orthoptera), mariposas (orden Lepidoptera), hormigas (familia Formicidae), arañas (familia Nephilia), chinches (familia Reduviidae), chicharritas (familia Cicadellidae) y una especie en anfibio (*Eleutherodactylus nitidus*). No se observaron aves ni reptiles, (Figura 16). Los insectos se encontraron en los meses de agosto a diciembre.

Tabla 16. - Taxas encontrados en barreras vivas y ambientes asociados.

Tipo	Especie/taxón	Nombre común	Hábitat observado	Estatus
Aves	<i>Calothorax lucifer</i>	Chupaflor	<i>E. coralloides</i>	Residente
	<i>Columbina inca</i>	Coquita	Amplia	Residente
	<i>Falco sparverius</i>	Cernícalo	Amplia	Migratoria
	<i>Pipilo fuscus</i>	Vieja	Amplia	Residente
	<i>Polioptila calendula</i>	Perlita	Amplia	Migratoria
	<i>Pyrocephalus rubinus</i>	Cardenalito	<i>A. farnesiana, E. coralloides</i>	Migratoria
	<i>Sayornis phoebe</i>	Papamosca	Amplia	Migratoria
	<i>Toxostoma curvirostre</i>	Cuitlacoche	<i>E. polystachya</i>	Residente
Anfibios	<i>Eleutherodactylus nitidus</i>	Ranita grillo	Barrera viva	Nativa
Reptiles	<i>Cnemidophorus gularis</i>	Sabandija	Amplia	Nativa
Insectos	Orden <i>Orthoptera</i>	Chapulines	Amplia	SD
	Orden <i>Lepidoptera</i>	Mariposas	Amplia	SD
	Familia <i>Nephilia</i>	Araña	Barrera viva	SD
	Familia <i>Cicadellidae</i>	Chicharritas	Barrera viva	SD
	Familia <i>Reduviidae</i>	Chinches	Barrera viva	SD
	Familia <i>Formicidae</i>	Hormiga	Barrera viva	SD

Fuente: Elaboración propia.

Por el contrario, en las barreras vivas preexistentes se observaron ocho especies de aves, asociadas a *E. coralloides*, *Acacia farnesiana* y *E. polystachya*. Cuatro especies tienen estatus migratorio (*Falco sparverius*, *Polioptila calendula*, *Pyrocephalus rubinus*, y *Sayornis phoebe*), y tres residentes (*Calothorax lucifer*, *Columbina inca* y *Pipilo fuscus*). El único reptil encontrado fue *Cnemidophorus gularis*, conocido como sabandija, se observó tanto en barreras vivas preexistentes como en sitios diversos ya fuera caminos, muros de piedra y campos agrícolas, (Tabla 13).

3.3.6 Percepción e historicidad de las barreras

Respecto a la historicidad del uso de la tierra, la persona entrevistada menciona que el reparto agrario se realizó entre los años de 1942-1944, producto de la disgregación de la Hacienda Buenavista, la cual dio pie a la conformación de varios ejidos, posiblemente correspondan a los actuales ejidos conocidos como: Pie de Gallo, Buenavista, Santa Catarina, Jofrito y otros más.

Algunas de las tierras entregadas a los campesinos no tenían un uso agrícola activo, se desmontaron en el año de 1946, eliminando la cobertura vegetal natural probablemente conformada por *Acacia farnesiana* y *Mimosa* sp., y desde entonces tienen un uso agrícola, es decir en 2018 se cumplen 72 años de agricultura de temporal. Según indicaciones de la persona entrevistada, los terrenos desmontados corresponden al actual predio de “El Venado” y otros alrededores. No se tienen datos sobre cuándo la Hacienda Buenavista comenzó a hacer uso por primera vez del suelo con fines de explotación agrícola.

El arado de la tierra se hacía anteriormente por tracción animal (yunta de buey) y se sembraba agricultura de temporal, posiblemente maíz, frijol y calabaza (como se hace ahora). Se menciona que se abonaba con composta de estiércol (posiblemente de vacuno).

En los años 70's se ejecutaron obras gubernamentales con el objeto de crear terrazas en cuyos límites se sembraron nopales proporcionados por el mismo gobierno. En la entrevista hay una confusión respecto a la técnica empleada para formar las tornas, ya que en un inicio se menciona que fueron hechas a máquina, pero posteriormente se dijo que fueron hechas a mano por los mismos campesinos. Una interpretación personal, es que las calles que dividen los predios agrícolas del ejido se crearon empleando maquinaria, mientras que el trazado y conformación de las tornas fue a mano, ya que este proceso menciona que duró mucho tiempo y se les pagaba a los campesinos en especie.

Actualmente las barreras vivas tienen menos de 48 años de existencia y poseen muchas más especies de las que fueron inicialmente sembradas. Este

proceso, posiblemente se debió a que estos sistemas fueron tolerados y estuvieron sometidos a un escaso manejo por parte de los agricultores, por tanto, especies nativas de rápido crecimiento aprovecharon estos espacios, los cuales fueron colonizando paulatinamente hasta conformar las actuales barreras vivas.

En resumen, se puede considerar que en los predios donde se ejecutaron las barreras vivas nuevas tienen antigüedades distintas en cuanto al uso agrícola del suelo. En el predio “El Venado” se estima que la actividad agrícola tiene 72 años de uso; mientras que en el predio de “Eulalia” y “La Era” la actividad agrícola es indeterminada, pero anterior al predio de “El Venado”, debido a que su uso se remonta a la antigua administración de la Hacienda Buenavista, cuya historia se desconoce para este documento.

3.4 Discusión

Supervivencia y crecimiento de las barreras vivas

En cuanto a la supervivencia de cada especie, *P. granatum* presentó el valor más alto con 58.3% (28 supervivientes de 48 iniciales), seguido de *E. polystachya* con 27.2% (18 supervivientes de 66 iniciales), *E. coralloides* con 26.2% (21 supervivientes de 80 iniciales), y finalmente *F. carica* con 22.7% (18 supervivientes de 79 iniciales). Estos valores indican que especies son más tolerantes a las condiciones ambientales particulares del sitio de estudio, sin embargo no muestran la capacidad real de crecimiento y desarrollo para conformar las barreras vivas.

Al final del monitoreo la supervivencia total de los ejemplares fue de 31.14% (85 supervivientes de 273 árboles iniciales) sin distinción de especie ni predio. Este valor es similar al promedio estatal de Querétaro (30.9%) presentado por CONAFOR en 2014, pero menor a la media nacional (56.62%) en 2014 (Vanegas, 2016).

La supervivencia de las barreras en cada predio fue distinta; “El Venado” presentó mayor supervivencia con 44.3%, seguido de “Eulalia” 29.9% y finalmente

“La Era” con 11.86%. La variación entre predios puede deberse a: 1) condiciones edáficas distintas, 2) esquemas de manejo variables, 3) restricciones climáticas y 4) herbivoría causada por insectos. Dichos puntos se describen a continuación:

1) Las condiciones edáficas pudieron afectar la supervivencia y desarrollo de las especies sembradas. Por ejemplo los suelos presentes en el predio de “La Era” (Kastanozem_1 y Kastañozem_2), son ricos en materia orgánica y excelentes para uso agrícola por tanto permiten un adecuado desarrollo vegetativo; por el contrario el suelo del predio de “Eulalia” (Vertisol), aunque son muy fértiles presentan procesos de contracción y expansión de las arcillas dentro del suelo generando grietas verticales (WRB, 2007) que pueden afectar el desarrollo radicular de las especies que conforman las barreras vivas y por ende su crecimiento.

2) El manejo por parte de los agricultores, siendo el riego el punto crucial. Se observó que no todas las barreras vivas de recién establecimiento recibieron el mismo mantenimiento por parte de los agricultores, por ejemplo en el predio “El Venado” las barreras eran regadas cuando menos una vez a la semana, en contraparte los otros dos predios no recibieron riego posterior a la siembra y por ende su supervivencia fue menor.

3) Las restricciones climáticas juegan un papel determinante en la supervivencia de las barreras. En la zona se presentan severas heladas en invierno de 20 a 40 días de heladas anuales, de enero a marzo (PRPC, 2010), y sequías de marzo a junio, por lo que en conjunto representan seis meses de estrés climático e hídrico que interrumpen el crecimiento y amenazan la supervivencia de los árboles; estas afectaciones climáticas incidieron sobre todas las parcelas por igual.

4) La herbivoría pudo afectar al desarrollo y la supervivencia de las barreras. El ataque de organismos del *taxa* Orthoptera (vulgarmente conocidos como chapulines) ocasionó pérdida de follaje; dichos organismos comienzan su actividad desde agosto, presentando su máxima actividad en octubre-noviembre, periodo durante el cual se evidencian mayores afectaciones, atacando principalmente a *P. granatum*, *E. coralloides* y *F. carica*. A diferencia de las especies anteriores, *E. polystachya* no presentó herbivoría ni afectaciones por insectos, posiblemente esta

especie tenga características biológicas que le permitan salir impune ante ataques. Se requiere mayor investigación al respecto para cuantificar los daños que ocasionan estos insectos y su influencia real en el crecimiento y supervivencia de estas y otras especies.

El crecimiento de las barreras vivas se evaluó de acuerdo a su crecimiento anual y su comportamiento de desarrollo (fenológico) al cabo de 17 meses. Respecto al crecimiento anual de las especies leñosas, se consideró que el crecimiento en perímetro de tallo y en altura, son indicadores de un buen desarrollo de la planta ya que indican acumulación de biomasa; la cobertura no es un indicador fiable ya que varía enormemente por diversos factores ambientales y por las características fenológicas de las especies empleadas. Bajo este criterio se encontró que *E. polystachya* presentó un desarrollo constante en perímetro del tallo, cobertura y altura (incremento de 2.7 cm, 231 cm y 51.2 cm respectivamente); *E. coralloides* presentó crecimiento de tallo (2.1 cm); *P. granatum* solamente se desarrolló en crecimiento de tallo y cobertura (0.8 cm y 21.5 cm respectivamente); y *F. carica*, desarrolló solamente cobertura (56.5 cm). En resumen, las primeras tres especies presentaron un crecimiento en tallo; mientras que la última especie su incremento fue menor.

Respecto a la fenología y crecimiento de las especies se encontró que *E. polystachya* presenta un desarrollo estacional, comenzando su crecimiento en altura y cobertura a partir del mes de junio, para posteriormente detener su crecimiento en diciembre; el crecimiento del perímetro del tallo comenzó en julio para posteriormente decaer en diciembre. La especie *E. coralloides*, mostró un desarrollo marcadamente estacional, creciendo en altura y cobertura a partir de abril, en octubre comienza a perder cobertura finalizando en diciembre; el crecimiento de circunferencia de tallo varió mes con mes, pero siempre en aumento. El frutal *P. granatum* presentó un desarrollo brevideciudo, mantuvo su cobertura casi todo el año (exceptuando diciembre a febrero) por medio de abundantes rebrotes de hojas, los cuales a su vez mantuvieron constante la altura; el crecimiento del perímetro del tallo se disparó en febrero para decaer en marzo, posiblemente por estrés hídrico. Finalmente *F. carica*, especie domesticada con desarrollo

estacional, comenzó su crecimiento en marzo con incremento en la cobertura para posteriormente perderla en diciembre; el tallo no mostró variaciones significativas en crecimiento, aumentando ligeramente su perímetro.

Se atribuyó la reducción del tallo y altura de todas las especies a factores climáticos, de manejo y en menor instancia por herbivoría, ya que las heladas, sequías y “podas” no programadas dañaban las puntas de los árboles generando que se secaran y con ello una pérdida de altura, en ocasiones el daño era tal que se secaba la vara principal, afectando así las mediciones de perímetro y altura.

El comportamiento fenológico y de crecimiento mostró que el ensamble de barreras vivas propuesto en este trabajo fue adecuado pero no así los ejemplares que conforman estas BV, ya que aunque las especies *E. polystachya*, *P. granatum* y *E. coralloides* se comportaron de manera que tienen potencial de ser empleadas en la conformación de estos sistemas, hubo factores no considerados en el diseño de la intervención en campo y que posiblemente afectaron al desarrollo de todos los ejemplares. Por ejemplo: 1) la suposición de diversidad genética entre los organismos adquiridos (sin posibilidad de comprobación directa); 2) la suposición de haber adquirido planta de excelente calidad, sin plagas ni daños en raíz que pudieran afectar su desarrollo futuro, en este caso *F. carica* es una especie altamente tolerable a diversidad de climas y suelos de distinta calidad (Vazquez-Yanez *et al.*, 1999), pero en el presente estudio su desarrollo no fue óptimo; 3) suposición de una adecuada adaptación de la planta a las condiciones edáficas y climáticas del sitio de estudio; 4) y la suposición de que un mantenimiento (manejo) estándar en campo beneficiaría a todas las especies por igual, siendo que se tienen especies domesticadas que requieren de cuidados especiales y especies nativas que pueden desarrollarse sin mayor problema, como *E. polystachya* que se crece sin dificultades en sitios perturbados (Vazquez-Yanez *et al.*, 1999).

En resumen tomando en cuenta la supervivencia, el crecimiento anual y su comportamiento fenológico, se considera que *E. polystachya*, *P. granatum* y *E. coralloides* son especies con potencial para ser empleadas en la conformación de nuevas barreras y enriquecimiento de las existentes el sitio de estudio, con potencial

de ser empleadas en la microcuencia y otras zonas con similares condiciones ambientales. En contraparte *F. carica* no mostró resultados contundentes, ya que se sospecha que la planta adquirida tuviera raíz nudosa, permanecer demasiado tiempo en vivero, situación que afectó negativamente desarrollo y supervivencia de esta especie en campo, por ello en el presente estudio el uso de esta especie no se descarta ni se fomenta, sino se recomienda realizar mayor investigación al respecto.

Respecto al hábitat que ofrecen estos sistemas, se encontró que las BV preexistentes brindan albergue a siete especies de aves, especialmente los árboles de *E. coralloides*, *Acacia farnesiana* y *E. polystachya*; en contraparte, las BV recién establecidas en este proyecto solamente brindan hábitat estacional a insectos. Dichos organismos prefieren árboles frutales de *P. granatum* y *F. carica*, esta situación sugiere que dada la composición de especies de las barreras vivas recién establecidas, se podría esperar que a futuro funjan como hábitat de especies y que puedan enlazarse con otras barreras para generar conectividad, pero por el momento no se pueden extraer más conclusiones.

Condiciones edáficas

Se encontró que en el predio “El Venado” con suelos Kastanozem_1 y Kastanozem_2, presentaron mejores condiciones del suelo en sitios donde se efectúa la agricultura comparada con aquellos que albergan las barreras vivas. Las principales diferencias fueron en el COT y la relación C/N, dichas diferencias pueden deberse a procesos de manejo como 1) el abonado anual con estiércol el cual puede mejorar las condiciones del suelo agrícola, 2) la elección de los agricultores por las mejores tierras para cultivar, relegando las de baja calidad para otros usos y; 3) las acciones de abonado y arado son variables no consideradas y que pueden estar influyendo en el recurso edáfico. Asimismo distintos procesos edafogenéticos como la erosión, el transporte y deposición de sedimentos (Buol y McCracken, 2017) pueden estar contribuyendo a que los suelos de uso agrícola presenten mejores condiciones de fertilidad. En términos de supervivencia de las BV se desarrollan mejor en los suelos Kastanozem_1 y Kastanozem_2, ya que las especies presentaron mayor porcentaje de supervivencia al cabo de 2 años, destacando *P.*

granatum con un 61.54% de supervivencia, seguido de *F. carica* con 42.86%, *E. polystachya* con 35.71% y finalmente *E. collaroides* con 34.48%.

En contraparte, el predio de “Eulalia” el Vertisol presentó mejores condiciones edáficas en los sitios donde se desarrollan barreras vivas, destacado un mayor COT (50% más), mayor contenido de nitrógeno, mayor porosidad y una relación C/N que evidencia mayor actividad biológica. Sin embargo, aunque la evidencia que muestra el predio de “Eulalia” pueda indicar que las barreras vivas puedan estar mejorando las condiciones del suelo Vertisol, este resultado no puede atribuirse completamente a las barreras vivas ya que diversos procesos edafogénicos (Buol y McCracken, 2017) como: 1) la erosión, transporte de nuevo material, acumulación de sedimentos, 2) el auto-arado natural por la expansión-contracción de arcillas, y diversos procesos de manejo como 3) la ausencia de labranza, abonado, 4) la presencia de vegetación herbácea, 5) mulch vegetal y otros factores no considerados, pueden estar influyendo en mayor o menor medida a que el suelo presente las condiciones observadas. En términos de supervivencia de las BV se encontró que en este suelo las barreras no se desarrollan adecuadamente, a excepción de *P. granatum* con un 54.55% de supervivencia, seguido de *E. polystachya* con 31.58%, *E. collaroides* con 21.43% y finalmente *F. carica* con 17.24%, al cabo de 2 años, posiblemente al proceso natural de expansión y contracción de arcillas que dañan el sistema radicular de las plantas.

Se considera que para interpretar adecuadamente la relación C/N se requiere mayor tiempo de estudio de la dinámica de estos nutrientes en el suelo, ya que esta relación fluctúa de acuerdo a las condiciones abióticas y a las condiciones de manejo al cual esté sometido el suelo, en especial en sitios con una marcada estacionalidad (Celaya-Michel y Castellanos-Villegas, 2011), por ello se plantea monitorear esta relación a largo plazo para conocer en primera instancia su dinámica general de nutrientes en los distintos grupos de suelo estudiados. Por ello se requiere realizar mayores estudios y a largo plazo sobre los efectos de estos SAF en el suelo, ya que los resultados no son concluyentes, debido a que la escala de tiempo en la cual la vegetación y el suelo se desenvuelven son mayores al tiempo de monitoreo efectuado en este trabajo.

Funcionalmente, los tres grupos de suelos estudiados pueden estar jugando distintos roles en diversos procesos en la microcuenca. Por ejemplo, el Vertisol se caracteriza por desarrollarse en zonas con una marcada estacionalidad de sequía y humedad alternadas (WRB, 2007), donde las arcillas expandibles mezclan el suelo anualmente y no permiten el desarrollo de especies forestales con sistemas radiculares horizontales, asimismo cuando dicho suelo se satura, la escorrentía superficial se acentúa (Buol *et al.*, 2017) teniendo como consecuencia erosión laminar que, de ser excesiva, podría afectar la calidad del agua en los cauces y disminuir la capacidad de almacenamiento de los cuerpos de agua de la zona baja de la cuenca; por ello se recomienda realizar un adecuado manejo del agua para prevenir la erosión (WRB, 2007), sobretodo en laderas. Asimismo, es probable que en este suelo, las BV puedan estar contribuyendo al almacenamiento de carbono en el suelo y con ello mejorando su estructura (ver porosidad, Tabla 13) y fertilidad, ya que en los sitios donde estas se desarrollan se presentó un 50% más COT (8.58 g/kg) que donde se efectúa agricultura de temporal (4.29 g/kg); esto se traduce a que el recurso edáfico aporta algunos servicios ecosistémicos como de provisión (mejora de fertilidad edáfica mejora oferta de alimentos), de regulación climática (por secuestro de carbono) y de sustento (Balvanera y Cotler, 2009), sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, esto no puede atribuirse completamente a las BV, ya que el suelo puede estar alimentado por procesos de iluviación al estar en una forma cóncava lo cual permite la acumulación de material arrastrado por la pendiente; por tanto las BV en este suelo pueden estar ayudando a mejorar las condiciones edáficas apoyadas por otros factores siendo en este caso el relieve.

El Kastanozem_1 alberga naturalmente pastizales, presenta un horizonte mólico oscuro, indicio de una alta cantidad de materia orgánica almacenada (WRB, 2007) y que al igual que el Vertisol supone un almacén de carbono (5.46 g/kg) en sitios agrícolas y (5.85g/kg) en sitios con barreras; asimismo este suelo presta diversos servicios ecosistémicos mencionados anteriormente. Por último, el Kastañozem_2 presenta un horizonte mólico que almacena grandes cantidades de carbono, incluso mayores al Vertisol, ya que en los sitios agrícolas presenta 10.14

g/kg y en los sitios con barreras vivas 9.36 g/kg de COT total. Por ende, este grupo de suelo es especialmente importante en la prestación de diversos servicios ecosistémicos antes mencionados. En cuestiones de manejo, son excelentes para la agricultura, es recomendable controlar la erosión eólica e hídrica, no sobrepastorear y evitar riegos con aguas con alta concentración de sales para prevenir la salinización de este recurso (WRB, 2007).

Todos los suelos estudiados funcionan en mayor o menor medida como almacenes de carbono y prestan diversos servicios ecosistémicos y sirven de soporte para las actividades agrícolas y a las mismas barreras vivas, por tanto su estudio y adecuado manejo es crucial para continuar y mejorar las actividades productivas y acciones encaminadas a mejorar el funcionamiento del agroecosistema ya sea empleando sistemas de barreras vivas u otras acciones similares. Por ello debe realizarse mayor investigación a largo plazo para probar las hipótesis planteadas por Moreno y Casas, 2010; Bravo *et al.*, 2011; y Hernández *et al.*, 2012, referentes a la mejora de las condiciones del suelo y productividad agrícola por medio del empleo de diversos sistemas agroforestales.

La existencia de dos grupos de suelos distintos (Vertisol y Kastanozem) en sitios relativamente cercanos de la zona funcional media se atribuye a diferencias del relieve, ya que el Vertisol se desarrolló sobre un pie de monte de forma cóncava, permitiendo procesos de iluviación por arrastre de suelo de zonas más altas, permitiendo el desarrollo de un perfil profundo; en contraparte, los Kastanozem se desarrollaron en un valle aluvial de forma convexa, cercana a un cauce intermitente por tanto están sometidos a procesos erosivos y por ende presentan un perfil somero. Las demás variables formadoras de suelo como la temperatura (media anual de 18.5 °C), precipitación (549 mm), roca madre volcánica (basalto), y vegetación (originalmente predominaba la selva baja caducifolia) son similares para toda la zona de estudio.

En síntesis, los análisis físicos y químicos arrojaron diferencias en porosidad, contenido de nitrógeno, de COT y de textura entre el suelo agrícola y en donde se implementaron las nuevas barreras vivas; pero esta diferencia no puede

atribuirse completamente a las barreras vivas ejecutadas en el presente proyecto pero no se descarta su influencia, ya que la duración del experimento fue corta por lo que es probable que otros factores no considerados en el presente experimento estén teniendo un papel en cuanto a los procesos edafogenéticos los sitios de estudio.

En las condiciones ambientales particulares de la microcuenca, el manejo que los agricultores efectúan a las barreras vivas juega un papel esencial en la supervivencia y éxito de establecimiento de estos SAF; ya que el control de factores adversos, como la herbivoría, daños por podas, riegos frecuentes, la protección de heladas, entre otros, son cruciales para el éxito de establecimiento de esta clase de sistemas. Asimismo, deben de considerarse otros aspectos como diversidad genética, calidad de plantas obtenidas de vivero y ausencia de enfermedades, factores que en el presente estudio no fueron considerados inicialmente y que posiblemente afectaron negativamente a la supervivencia y crecimiento de las especies que conforman las barreras vivas.

Se consideran *E. polystachya*, *P. granatum* y *E. coralloides* como especies con potencial para ser empleadas en sistemas agroforestales en la microcuenca, así como para diversos proyectos de restauración funcional. Por otra parte, se recomienda la elaboración de estudios socioeconómicos previos y de diagnóstico de las condiciones climáticas y edáficas de las zonas donde se planea intervenir, esto con el objeto de planificar adecuadamente las intervenciones en campo considerando en todo momento los intereses y limitantes particulares de los agricultores y demás actores involucrados.

3.5 Consideraciones finales

Los sistemas de barreras vivas instauradas requieren monitoreo a largo plazo. Resulta relevante la conservación de los sistemas de barreras vivas preexistentes en la microcuenca, ya que restaurarlos *de novo* en el paisaje agrícola implica la inversión de dinero, mano de obra y tiempo para su mantenimiento de

desarrollo, recursos no siempre disponibles. Por otro lado, es importante que se continúe trabajando con los agricultores locales para que en la medida de lo posible fomenten esta práctica en sus parcelas.

Discusión general

La configuración espacial de las barreras vivas en la microcuenca es inversamente proporcional al grado de conservación de la cubierta vegetal, es decir, que el los sitio con menor cantidad de cubierta vegetal natural, hay más presencia de estos sistemas. Los sitios donde se encontraron las barreras vivas, sobre todo en la parte media y baja (límites de predios, caminos, terrazas y como vegetación ribereña sobre cauces de agua), en el caso de las terrazas las barreras pueden estabilizar el suelo mitigando procesos erosivos, como parte de la vegetación ribereña ayudar a la retención de sedimentos y mejorar la infiltración de agua, como límites de predios y caminos, y como barreras rompe vientos.

El tipo de vegetación que actualmente conforma las barreras vivas en la microcuenca, son especies que posiblemente fungan como corredores y brinden hábitat para aves y otras diversas especies; en este sentido se observó que principalmente son usadas por entomofauna, pero que también están presentes otros grupos taxonómicos como reptiles y aves.

Por las diversas especies que conforman estos sistemas y su distribución espacial en las zonas funcionales de la microcuenca, las barreras vivas pueden desempeñar diversos procesos, por ejemplo se está reportado que: 1) actúan como estructuras que retienen y mejoran el suelo (Pavón *et al.*, 2011; Quiñones *et al.*, 2013; Pérez *et al.*, 2017) proceso que es más evidente en la zona funcional alta y media, de esta manera permite la formación de terrazas que favorecen la actividad agrícola y la obtención de recursos secundarios (miel, leña, madera, forraje, etc.) de las especies que conforman las BV; 2) favorecen la infiltración de agua ya que permiten la estabilización de cauces y disminución de la escorrentía por la formación de terrazas, proceso evidente en la zona funcional baja de la microcuenca. En términos funcionales, estos sistemas de barreras vivas en conjunto pueden estar coadyuvando al mantenimiento de servicios ecosistémicos (Balvanera y Cotler, 2009): 1) de provisión por los recursos alimenticios y diversos materiales; 2) de regulación, de erosión, hídrica y polinización; 3) y de sustento por la productividad primaria, formación de suelos y albergue de especies. Sin embargo, para discernir

los servicios específicos que representan estos sistemas en el paisaje agrícola y como esta afecta a toda la microcuenca se requieren investigaciones particulares objeto de otro estudio.

Resultado de la evaluación de la capacidad de establecimiento *de novo* de estos sistemas empleando especies nativas y frutales se encontró que la supervivencia general de las BV fue de 31.14%; se consideró que la supervivencia fue afectada principalmente por condiciones climáticas, como estrés hídrico en los meses de diciembre a junio y bajas temperaturas con heladas severas (20-40 días anuales) (PRPC, 2010), asimismo una variable observada en campo, pero no cuantificada, que pudo afectar a la supervivencia fue la herbivoría, causada principalmente por chapulines (*taxa Orthoptera*) en los meses de agosto a noviembre. Por lo que se recomienda, que se debe proteger el tallo de las plantas con arropes de paja para reducir la desecación del suelo y con ello el estrés hídrico

La influencia de estos sistemas sobre las condiciones edáficas al cabo de un año mostró diferencias en el suelo Vertisol, favoreciendo los sitios donde se desarrollan las barreras vivas al encontrarse 50% más COT, 2.3 a 2.5 veces más nitrógeno y mayor porosidad; en contraparte, el suelo Kastanozem_1, presentó mejores condiciones edáficas en sitios agrícolas que donde se desarrollan las barreras, mostrando 7.1% más COT y 2.6 veces más nitrógeno en sitio agrícola, y un menor contenido de arcillas (17% menos); y el suelo Kastañozem_2, al igual que el anterior, presenta mejores condiciones edáficas en sitios agrícolas mostrando 0.78% más COT, 2.39 veces más nitrógeno y menor contenido de arcillas (22% menos) en sitio agrícola. Ver tabla 12. Sin embargo, como ya se mencionó en el capítulo III, dichas diferencias no pueden atribuirse completamente a las barreras vivas por 1) por cuestiones de manejo inherentes a la agricultura como la aplicación de abonos y el arado; y 2) por las escalas de tiempo en la cual operan los suelos, ya que las acciones que se efectúen sobre ellos no dan resultados inmediatos, sino que requieren años para mostrarse resultados contundentes, en especial cuando se trata de cuestiones de restauración. Estos dos puntos no considerados inicialmente en el diseño del experimento son cruciales para el diseño e implementación de cualquier estrategia productiva o de restauración funcional. Por

tanto, se considera que los resultados en cuestiones edáficas son parciales y se requiere mayor investigación al respecto, sin embargo, no se descarta la posible influencia del suelo en mejora de la productividad en sitios donde se desarrollan estos sistemas como lo mencionan Bravo *et al.*, (2011) y Hernández *et al.* (2012).

En términos generales se encontró que el uso de las barreras vivas como una potencial estrategia de restauración del paisaje agrícola en las condiciones particulares de la microcuenca depende de tres factores.

A) Una adecuada elección de especies resaltando la importancia del empleo de árboles nativos. La siembra de especies locales concede hábitat potencial para diversos organismos, por ejemplo se observó que *E. collaroides* es usada por aves como *Calothorax lucifer* y *Pyrocephalus rubinus* como sitios de descanso (ver Tabla 16); además las especies nativas tienen mayores oportunidades de sobrevivir y desarrollarse adecuadamente en las condiciones ambientales locales, como es el caso de *E. polyschaya*, especie nativa de crecimiento estacional que presentó un adecuado crecimiento en tallo, altura y cobertura, ver figura 19.

B) Una adecuada configuración espacial, ya que puede favorecer la generación de conectividad y diversas funciones según su ubicación dentro de la microcuenca. Por ejemplo, en la zona funcional alta y media, estos sistemas pueden fungir como estructuras que retienen el suelo, favorecer la formación de terrazas, mejorar suelos y disminuir la escorrentía superficial; y en la zona baja favorecer la infiltración. La totalidad de las barreras, a nivel de paisaje suponen formas de cobertura arbórea que de enlazarse unas con otras pueden conformar corredores de vegetación debido a que presentan diferentes estratos, recursos florales, copas que reducen la temperatura del suelo, entre otros, donde diversos organismos pueden asentarse y trasladarse a través de la matriz agrícola.

C) El esquema de manejo al cual estos sistemas están sometidos. Las restricciones ambientales (estrés hídrico y heladas) suponen la principal barrera para el establecimiento *de novo* de estos sistemas, por tanto un manejo adecuado (riegos, control de plagas y podas) fomenta una mayor supervivencia y desarrollo, al mitigar el estrés al cual están sometidos naturalmente las barreras vivas.

Dado el escaso desarrollo de sus ejemplares y el poco mantenimiento al cabo de 17 meses indicó que los agricultores no tienen intereses sólidos en el establecimiento de estos sistemas, aun cuando a mediano y largo plazo les provean de alimentos y diversos beneficios. Situación que puede deberse a diversos aspectos observados en campo como la escasez de mano de obra para el mantenimiento de los árboles, falta de agua para riego y restricciones económicas que propician que los agricultores prioricen otras actividades.

Esta particular situación pone de manifiesto la necesidad de realizar un diagnóstico ambiental y socioeconómico previo a la elaboración de cualquier estrategia de restauración, a manera de que cuando esta se lleve a cabo se busque cumplir múltiples objetivos tales como las necesidades particulares de los actores involucrados, mejorar las condiciones ambientales en pro de recuperar procesos ecológicos de interés, tal y como lo realizaron Cervantes *et al.* (2014), autores que elaboraron estudios diagnóstico contemplando el estado actual de la comunidad y factores de disturbio del sistema socio-ecológico de San Nicolás Zoyatlán en el estado de Guerrero con el objeto de establecer estrategias de restauración, como resultados encontraron que los conflictos agrarios fueron la principal causa de degradación del suelo y la vegetación, ante esta situación los autores diseñaron una intervención basada en la siembra de sistemas agroforestales y plantaciones a modos de reforestación tomando en cuenta los intereses de los productores; a más de una década de ser implementados estos sistemas son manejados por los habitantes y han mejorado el suelo. El caso anterior ejemplifica sobre como la articulación de herramientas de las ciencias sociales y biológicas puede derivar en diagnósticos acertados y que deriven en estudios de caso exitosos.

Para finalizar, se espera que el presente estudio funja como línea base para estudios posteriores en la microcuenca Buenavista respecto a aspectos productivos, de restauración y conservación de los recursos; todo en aras de mantener e incluso mejorar procesos y funciones de la cuenca, que reditúen tangiblemente en mejorar la calidad de vida de sus habitantes y los ecosistemas que la conforman.

Conclusiones

Se concluye que se cumplieron los objetivos planteados para esta tesis, se identificaron la composición y distribución espacial de las barreras vivas en la microcuenca Buenavista; se implementaron nuevos sistemas y se monitoreó su desarrollo y cambio en las condiciones edáficas, encontrando que las barreras vivas están distribuidas en las tres zonas funcionales y estas pueden estar jugando un papel importante en el funcionamiento de la microcuenca al mitigar procesos erosivos, estabilizar terrenos, ofrecer hábitat para la fauna y mejorar las condiciones edáficas. Por ende se considera que estos sistemas de barreras vivas sí suponen una potencial estrategia de restauración funcional, sin embargo aún se requieren mayores estudios a largo plazo.

Esta tesis aporta elementos metodológicos nuevos para la identificación de dichos sistemas agroforestales por medio de sistemas de percepción remota, aporta conocimientos nuevos sobre la composición y distribución de sistemas agroforestales en el trópico seco, y genera conocimientos sobre las condiciones edáficas de la microcuenca.

Bibliografía

- Aguilar, S. (1995) Cambios tecnológicos en la agricultura región Celaya, Guanajuato. *Revista agrícola*, 21:79-87
- Altieri, M. y Nicholls, C. (2005) *Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture*. Primera edición. PNUMA. ISBN 968-7913-35-5
- Armenteras, D. y Vargas O. (2016) Patrones del paisaje y escenarios de restauración: acercando escalas. *Acta Biol. Colomb.*, 21(1): 229-239
- Arriaga, V., Cervantes, V. y Vargas-Mena, A. (1994) *Manual de reforestación con especies nativas*. Primera edición. UNAM. INE. México. ISBN 968-838-297-7
- Balvanera, P. y Cotler H. (2009). *Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos, en Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, México, pp. 185-245.
- Barnes, T. (1999) Landscape ecology and ecosystems management. *Cooperative Extension Service*. University of Kentucky, College of Agriculture. Disponible en: <http://www2.ca.uky.edu/agcomm/pubs/for/for76/for76.pdf> Consultado el 15/02/2017.
- Barrera, J., Contreras, S., Garzón, N. y Moreno, C. (2010) *Manual para la restauración ecológica de los ecosistemas disturbados del Distrito Capital*. Escuela de restauración ecológica. Pontificia Universidad Javeriana. Guatemala.
- Blanke, V., C. Renker, M. Wagner, K. Fullner, M. Held, A. J. Kuhn y F. Buscot. (2005). Nitrogen supply affects arbuscular mycorrhizal colonization of *Artemisia vulgaris* in a phosphatepolluted field site. *New Phytologist* 166:981-992. En Pavón, N., Ballato-Santos, J. y Pérez-Pérez, C. (2011) Geminación y establecimiento de *Mimosa aculeaticarpa* var. *Biuncifera* (Fabaceae-Mimosoidae). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82:653-661.
- Bozzano, M., Jalonen, R., Thomas, E., Boshier, D., Gallo, L., Cavers, S., Bordács, S., Smith, P. y Loo, J. (2014) *Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species*. Thematic Study. Rome, FAO y Biodiversity International.
- Bradshaw, A. (1997) *Restoration Ecology and Sustainable Development*. Eds. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 413 pp.
- Bravo-Hollis, H. (1978). Las cactáceas de México. Vol. I. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. México. 719 pp. En Quiñones, A., González, V., Chávez, J., Vargas, A. y Barrientos, F. (2013) Evaluación de inoculantes promotores de crecimiento en la producción de plantas de mezquite en Durango. *Mex. Cien. For.*, 4(20): 73-80

- Bravo, M., Ruíz, J y Volke, V. (2005) Cultivo de maíz en sistemas de labranza con barreras biofísicas en andosoles de ladera. *Terra Latinoamericana*, 23(3): 371-380. Chapingo, México.
- Bravo, M., Trinidad, J., Barrera, G., Medina, L., Mendoza, M. Prat, C. y García, F. (2011) *Tecnologías agroecológicas para la restauración de suelos degradados en la subcuenca de Coitzio, Michoacán*. Folleto técnico num. 28, INIFAP. ISBN 978-607-425-701-4
- Burgos, A., Bocco, G. y Sosa, J. (2015) *Dimensiones sociales en el manejo de cuencas*. Primera edición. CIGA-UNAM 308 pp ISBN: 978-607-02-6883-0
- Buol, S., Hole, F. y McCracken, R. (reimp. 2017) *Génesis y clasificación de suelos*. Trillas. Segunda edición. 417 pp. ISBN 978-968-24-3931-5
- Calderon, I., Rivera, V., Porter, L., Martínez, A., Ladah, L., Martinez-Ramos, M., Alcocer, J., Santiago, A., Hernández, H., Reyes, V., Pérez, D., Díaz, V., Sosa, J., Herrera, J. y Búrquez, A. (2012) An assesment of natural and human disturbance effects on Mexican ecosystems: current trends and reseach gaps. *Biodivers. Conserv.*, 21: 589-617.
- Calle, A., Calle, Z., Garen, E., and A. Del Cid-Liccardi, eds. (2014) *Simposio sobre Restauración Ecológica y Agropaisajes Sostenibles*. Iniciativa de Liderazgo y Capacitación Ambiental. New Haven, CT: Universidad de Yale; Ciudad de Panamá: Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales. ISBN 978-9962-614-28-9
- Carabias, J. y R. Landa. (2008). Los recursos hídricos y la gestión de cuencas en México. En: L. Paré, M. A. González y D. Robinson. *Gestión de cuencas y servicios ambientales: perspectivas comunitarias y ciudadanas*. INE-ITACA-Raises-Sendas-WWF, México. 303 pp.
- Cartaya, S., Zurita, S., Rodriguez, E. y Moltalvo, V. (2015) Comprobación del NDVI en imágenes RapidEye para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista San Gregorio*, 10(2): 75-92.
- Castaño, I. (2007) *Plantas alóctonas invasoras en el Principado de Asturias*. Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructura "La Caixa". 192 pp.
- Ceccon, E. (2013) *Restauración en bosques tropicales: fundamentos ecológicos prácticos y sociales*. Ediciones D. D. S. México. Primera edición. 288 pp. ISBN: 978-84-9969-615-7
- Celaya-Michel, H. y Castellanos-Villegas, A. (2011) Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, 29(3):343-356.
- Cervantes, V., Gama, J., Roldán, I. y Hernández, G. (2014) Bases para implementar estrategias de restauración: el sistema socio-ecológico San Nicolás Zoyatlán, Guerrero, México. *Terra Latinoamericana*, 23(2): 143-159

- Cervantes, V., López, M., Salas, N. y Hernández, G. (2000) *Técnicas para propagar especies nativas de selva baja caducifolia y criterios para establecer áreas de reforestación*. UNAM y PRONARE-SEMARNAT. México, D.F. 174 pp.
- Chaves, J. (2004) Desarrollo tecnológico en la primera revolución industrial. *Norba. Revista de Historia*, 17: 93-109.
- CONAFOR (2013) *Sistemas agroforestales maderables en México*. CONAFOR. México. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/8/5572SISTEMAS%20AGROFORESTALES%20MADERABLES%20EN%20MEXICO%20AVM.pdf> Consultado el 07/09/2017.
- Cortes, J., Turrent, A., Hernández, E., Francisco, N., Torres, J., Zambada, A. y Díaz, P. (sin año) *Milpa intercalada con árboles frutales (MIAF)*. SAGARPA, COLPOS. Disponible en: www.campopotosino.gob.mx/index.php/.../240-archivos?...milpa-intercalada...frutales Consultado el 22/08/2018.
- Cotler, E. 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, E. comp. (2004) *El manejo integral de cuencas en México*. INE-SEMARNAT, México. 264 pp. ISBN 968-817-700-8
- Cotler, H. coord. (2010) *Las cuencas hidrográficas de México, diagnósticos y priorización*. Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V. 231 pp. ISBN: 978-607-7655-07-7
- Cotler, H. y Caire, G. (2009) *Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México*. INE, SEMARNAT, WWF y Fundación Río Arronte I.A.P. Primera edición. México. 380 pp. ISBN 978-968-817-904-8
- Cotler, H. y Pineda, R. (2008) Manejo integral de cuencas en México ¿hacia dónde vamos? *Boletín de Archivo Histórico del Agua*. Disponible en: <http://132.248.9.34/hevila/Boletindelarchivohistoricodelagua/2008/vol13/no39/2.pdf>
- Dobson, A., Bradshaw, A. y Baker, A. (1997) Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science*, 277(5325): 515-522.
- Duarte, C. (2006) *Cambio global; impacto de la actividad humana sobre el sistema tierra*. Consejo superior de investigaciones científicas, CSIC, Madrid. 166 pp.
- Escalante, A. y Grande, C. (2014) *Análisis de la cobertura vegetal del área metropolitana de San Salvador y determinación de índices de cobertura vegetal del municipio Antiguo Cuscatlán*. III Congreso de Ingeniería y Arquitectura, Antigua Cuscatlán, El Salvador, Vol. 3, 9 pp.
- FAO (2000) *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Organización de la Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación. 329 pp. ISBN 92-5-304400-4

- FAO (2009) *Guía para la descripción de suelos*. Cuarta edición. Organización de las naciones unidas, Roma. 99 pp.
- Flores, H., De la Mora, C., Ruíz, J. y Chávez, A. (2013) Efecto de la cobertura de suelo de tres cultivos sobre la erosión hídrica. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. 12(1): 19-25. doi:10.5154/r.rchsza.2012.06.010
- Francisco, F. (2000) *Manejo de cuencas hidrográficas*. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Turrialba, Cota Rica. 35 pp.
- Gálvez, J. (2002) *La restauración ecológica: conceptos y aplicaciones*. Documento técnico número 8. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. Universidad Rafael Landivar, Guatemala.
- García, L. y González, M. (2017) Investigación ecológica participativa como apoyo a procesos de manejo y restauración forestal y silvopastoril en territorios campesinos. Experiencias recientes y retos en la sierra Madre de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88: 129-140
- García, E. y Lindig, R. (2011) Barreras e incentivos económicos para la restauración de la biodiversidad. *Acta Biológica Colombiana*, 16(2): 269-279
- Garrido, A., Pérez, D. y Enríquez, C. (2010). Delimitación de zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México. En: Cotler H. (Coord.) *Las cuencas hidrográficas de México*. Diagnóstico y priorización. México: Instituto Nacional de Ecología/Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. Disponible en: www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=639
- Giraldo, G. (2003) *Barreras vivas*. CIAT. Recuperado de http://teca.fao.org/sites/default/files/technology_files/BARRERAS%20VIVAS.pdf Consultado el 03/07/2018.
- Gliessman, S. (1998) *Agroecología: procesos ecológicos en la agricultura sostenible*. Turrialba, C.R. CATIE. Costa Rica. 359 pp. ISBN 9977-57-385-9
- Gregersen, H., Ffolliot, P. y Brooks, K. (2007) *Integrated watershed management: connecting people to their land and water*. CABI. Wallingford and Cambridge, Massachussets. 201 pp. ISBN: 9871-84593-281-7.
- Gurrutxaga, M. y Lozano, P. (2007) Criterios para contemplar la conectividad del paisaje en la planificación territorial y sectorial. *Investigaciones Geográficas*, 44: 75-88.
- Harvey, C. y Haber, W. (1999) Remnant trees and the conservation of biodiversity in Costa Rican pastures. *Agroforestry Systems*, 44: 37-68.
- Harvey, C., Villanueva, C., Villacís, J., Chacón, M., Muñoz, D., López, M., Ibrahim, M., Gómez, R., Taylor, R., Martínez, J., Navas, A., Saenz, J., Sánchez, Medina, A., Vilchez, S., Hernández, B., Perez, A., Ruiz, F., López, F., Lang, I., Sinclair, F. (2005) Contribution of live fences to the ecological integrity of agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111: 200-230.

- He, J., Weyerhaeuser, H., Xu, J. (2009) Participatory technology development for incorporating non-timber forest products into forest restoration in Yunnan, Southwest China. *Forest Ecology and Management*, 257: 2010-2016.
- Hernández, M., Ortega, R., Suaste, F., Ríos, R. y Bustos, C. (2012) Producción de maíz en un sistema agroforestal con arbustivas nativas de selva baja caducifolia, en temporal. En: Madrid, R. y Prieto, J. (2012) *Memoria de VII Reunión Nacional de Innovación Forestal*. INIFAP Querétaro, México.
- Hernández-Cuevas, L., Guerra, V. y Santiago-Martínez, G. (2011) Propagación y micorrización de plantas nativas con potencial para restauración de suelos. *Rev. Mex. Cien. For.*, 2(7): 87-96.
- Hobbs, R. y Norton, D. (1996). Towards a conceptual framework for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 4(2): 93-110.
- Hobbs, R., Higgs, E., Hall, C., Bridgewater, P., Chapin, F., Ellis, E., Ewel, J., Hallett, L., Harris, J., Hulvey, K., Jackson, S., Kennedy, P., Kueffer, C., Lach, L., Lantz, T., Lugo, A., Mascaro, J., Murphy, S., Nelson, C., Perring, M., Richardson, D., Seastedt, T., Standish, R., Starzomski, B., Suding, K., Tognetti, P., Yakob, L. and Yung, L. (2014) Managing the whole landscape: historical, hybrid, and novel ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12: 557–564.
- Holmes, K., Greco, S. y Berry, A. (2014) Pattern and process of Fig (*Ficus carica*) invasion in a California riparian forest. *Invasive Plant Science and Management*, 7(1): 46-58.
- INEGI (2004) *Guías para la interpretación de cartografía edafología*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. 27 pp. ISBN 970-13-4376-X
- ISRIC (1992) *Procedures for soil analysis*. International Soil Reference and Information Centre. Tercera edición. 118 pp. Disponible en: https://www.isric.org/sites/default/files/ISRIC_TechPap09.pdf Consultado el 07/08/2018.
- Jackson, L. (1992) The Role of ecological restoration in conservation biology. *Conservation Biology*. 443-451 Springer, Boston, MA. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4684-6426-9_17
- Jarchow, M., y Liebman, M. (2011). Maintaining multifunctionality as landscapes provide ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9:262.
- Lindenmayer, D., et al. (2008) A checklist for ecological management of landscapes for conservation. *Ecology Letters*, 11:78–91.
- Little, C. y Lara, A. (2010) Restauración ecológica para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile. *Bosque*, 31(3): 175-178.

- López, G. y Llorente, M. (2010) *La agroecología: hacia un nuevo modelo agrario*. Ecologistas en acción. Madrid. 62 pp. ISBN 978-84-936785-2-4
- López, T. (2007) Sistemas agroforestales. *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*. México. 1-8 pp. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Sistemas%20Agroforestales.pdf> Consultado el 15/02/2017.
- Maass, J.M. y H. Cotler. (2007) Protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas En: Cotler H. (Comp.). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental* (Segunda Edición). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México D.F. 41-58 pp.
- Machado, H. y Campos, M. (2008) Reflexiones acerca de los ecosistemas agrícolas y la necesidad de su conservación. *Pastos y forrajes*, 31(4), 1. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942008000400005&lng=es&tlng=es Consultado el 24/04/2018.
- Madrid, R. y Prieto, J. (2012) Memoria de VII Reunión de innovación forestal. INIFAP, Querétaro, México.
- Maginnis, S., Laestadius, L., Verdone, M., DeWitt, S., Saint-Laurent, C., Rietbergen, J. y Shaw, D. (2014) *Guía sobre la metodología de evaluación de oportunidades de restauración (ROAM): Evaluación de las oportunidades de restauración del paisaje forestal a nivel nacional o subnacional*. Documento de trabajo (edición de prueba). Gland, Suiza. UICN. 125 pp. Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/node/45770> Consultado el 05/04/2018
- Melo, F., Arroyo-Rodriguez, V., Fahrig, L., Martínez-Ramos, M. y Taballeri, M. (2013) On the hope for biodiversity-friendly tropical landscapes. *Trends in Ecology and Evolution*, 28(8): 462-468.
- Mendoza, S. (2011) *Diseño básico de un traspatio agroforestal para el prototipo de vivienda sustentable bicentenario para el estado de Querétaro*. Memoria para obtener título de Ingeniero Ambiental. Universidad Tecnológica de Querétaro. Querétaro.
- Mikel, G. y Lozano, P. (2007) Criterios para contemplar la conectividad del paisaje en la planificación territorial y sectorial. *Investigaciones Geográficas*, 44: 75-88.
- Molales, S. y Rovere, A. (2014) Restauración de un área de la reserva de la biósfera andino-norpatagónica: una propuesta basada en parámetros ecológicos y etnobotánicos. *Agrociencia*, 48: 751-763.
- Montagnini, F., Eibl, B. y Barth, S. (2011) Organic yerba mate: an environmentally, socially and financially suitable agroforestry system. *Bois et Forêts des Tropiques*, 308: 69-74.

- Moreno, A. y Casas, A. (2010). Agroforestry systems: restoration of semiarid zones in the Tehuacán valley, in central México. *Ecological Restoration*, 28(3): 361-368
- Moreno, A., Toledo, V. y Casas, A. (2013) Los sistemas agroforestales tradicionales de México: una aproximación biocultural. *Botanical Sciences*, 91(4): 375-398.
- Moreno-Calles, A., Galicia-Luna, V., Casas, A., Toledo, V., Vallejo, R., Santos-Fita, D. y Camou-Guerrero, A. (2014) La etnoagroforestería: el estudio de los sistemas agroforestales tradicionales de México. *Etnobiología* 12(3): 16.
- Narváez, A., Martínez, T., y Jiménez, M. (2016). El cultivo de maguey pulquero: opción para el desarrollo de comunidades rurales del altiplano mexicano. *Revista de Geografía Agrícola* (56): 33-44.
- Paré, L. y Gerez, P. coords. (2012) *Al filo del agua: cogestión de la subcuenca Río Pixquiac, Veracruz*. Casa Juan Pablos. 1ra edición. México. 344 pp. ISBN: 9786077908890
- Pavón, N., Ballato-Santos, J. y Pérez-Pérez, C. (2011) Geminación y establecimiento de *Mimosa aculeaticarpia* var. *Biuncifera* (Fabaceae-Mimosoidae). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82: 653-661.
- Pérez, A., Rodríguez, A., Nieto, J., Callejas, J. y Portillo, L. (2017) *Comparación de dos sistemas de Maguey (Agave salmiana)*. Universidad Politécnica de Francisco I. Madero. Primera edición. México. 69 pp. ISBN 978-607-9260-16-3
- Perring, M., Standish, R., Price, J., Craig, M., Erickson, T., Ruthrof, K., Whiteley, A., Valentine, L. y Hobbs, R. (2015) Advances in restoration ecology: rising to the challenges of the coming decades. *Ecosphere*, 6(8): 131.
- Pickett, S., Cadenasso, M. y Meiners, S. (2009) Ever since Clements: from sucesion to dynamics and understanding to intervention. *Applied Vegetation Science*, 12: 9-21.
- Pineda, R., y Hernández, L. (2000) *La microcuenca Santa Catarina, Querétaro: estudios para su conservación y manejo*. Universidad Autónoma de Querétaro. Primera edición. 147 pp. ISBN: 968-845-209-2
- Potschin, M., y Haines-Young R. (2011). Ecosystem services: exploring a geographical perspective. *Progress in Physical Geography*, 35: 575–594.
- PRPC Buenavista (2010) *Plan Rector de Producción y Conservación para la microcuenca Buenavista*. UAQ, México.
- Quiñones, A., González, V., Chávez, J., Vargas, A. y Barrientos, F. (2013) Evaluación de inoculantes promotores de crecimiento en la producción de plantas de mezquite en Durango. *Mex. Cien. For.*, 4(20): 73-80
- Restrepo, J., Angel, D. y Prager, M. (2000) *Agroecología*. CEDAF. República Dominicana. 120 pp. ISBN 99934-8-002-9

- Rey, J. (2012) Restauración de campos agrícolas sin competir por el uso de la tierra para aumentar su biodiversidad y servicios ecosistémicos. *Investigación ambiental*. 4(2): 101-110.
- Roever, C. L., van Aarde, R., y Leggett, K. (2013). Functional connectivity within conservation networks: delineating corridors for African elephants. *Biological Conservation*, 157:128-135.
- Romero, M. (2016) *Evaluación del índice de vegetación de diferencia normalizada para determinar en estado de conservación del Bosque de Ceja Andina suroccidental del Parque Nacional Sangay, Parroquia Achupallas, Canton Alausí, Provincia de Chimborazo*. Tesis de ingeniería forestal. Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Biobamba, Ecuador.
- Sánchez, O., Peters, E., Márquez-Huitzil, R., Vega, E., Portales, G., Valdez, M. y Azuara, D. (2005) *Temas sobre restauración ecológica*. SEMARNAT, México. 256 pp. ISBN 968-817-724-5
- Sarandón, S. y Flores, C. (2014) *Agroecología bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables*. 467 pp. 1ª ed. La Plata. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-950-34-1107-0
- Schindler, S., Sebesvari, Z., Damm, C., Euller, K., Mauerhofer, V., Schneidergruber, A., Biró, M., Essl, F., Kanka, R., Lauwaars, S., Schulz-Zunkel, C., Sluis, T., Kropik, M, Gasso, V., Krug, A., Puscj, M., Zulka, K., Lazowski, W., Hainz-Renetzeder, C., Henle, K. y Wrbka, T. (2014). Multifunctionality of floodplain landscapes: relating management options to ecosystem services. *Landscape Ecology*, 29: 229-244.
- Schulte, L., Liebman, M., Asbjornsen, H. y Crow, T. (2006) Agroecosystem restoration through strategic integration of perennials. *Soil and Water Conservation Society*, 61(6): 164-169.
- SEMARNAT (2012) *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental*. México. ISBN 978-607-8246-61-8 Disponible en: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf Consultado el 06/11/2017.
- SERI (Society for Ecological Restoration International Science and Policy Working Group). (2004) The SER International Primer on Ecological Restoration. Society for Ecological Restoration International. Disponible en: http://www.ser.org/content/ecological_restoration_primer.asp. En: Rey, J. (2012) Restauración de campos agrícolas sin competir por el uso de la tierra para aumentar su biodiversidad y servicios ecosistémicos. *Investigación ambiental* 4(2): 101-110.
- Siebe, C., Jahn, R. y Stahr, K. (2006) *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Segunda edición. México: sociedad Mexicana de la ciencia del suelo. 70 pp.

- Suding, K., Gross, K. y Houseman, G. (2004) Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology. *Trends in Ecology and Evolution* 19(1): 46-53
- Ugalde, Y., Maruri, B., Carrillo, I. y Sánchez, E. (2014) Estrategias para la restauración con un enfoque agroforestal de áreas degradadas circunscritas por zonas urbanas en la región semiárida de Querétaro. En: Nthe (2004) Restauración agroforestal remoción de contaminantes. *Revista electrónica de difusión y divulgación científica, tecnológica y de innovación de estado de Querétaro*, 8: 3-9
- Valdés, A., y Hernández, J. (2018) Zonas funcionales y unidades de paisaje físico-geográfico en la microcuenca Potrero de la Palmita, Nayarit, México. *Revista Geográfica de América Central* (60): 189-229.
- Vanegas, L. (2016) *Manual de mejores prácticas de restauración de ecosistemas degradados, utilizando para la reforestación especies nativas en zonas prioritarias*. CONAFOR. CONABIO. GEF-PNUD. México. 158 pp. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras/gef/pdf/1.2-5-manual-mejores-practicas-restauracion-especies-nativas.pdf> Consultado el 10/05/2018
- Vargas, O. (2007) *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino*. Universidad Nacional de Colombia, Colombia. 190 pp.
- Vargas, R. (2011) Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. *Acta Biol. Colomb.*, 16(2): 221-246.
- Vázquez-Yanes, C., Batis A., Alcocer M., Gual M. y Sánchez C. (1999) *Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO - Instituto de Ecología, UNAM. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/inicio.pdf Consultado el 02/09/2017.
- Viana, D., Cid, B., Figuerola, J. y Santamería, L. (2016) Disentangling the roles of diversity resistance and priority effects in community assembly. *Community Ecology*, 182: 865-875.
- Vieira, D., Holl, K. y Peneireiro, F. (2009) Agro-successional restoration as a strategy to facilitate tropical forest recovery. *Restoration ecology* 17(4): 451-459
- Vilá, M. y Ibañez, I. (2011) Plant invasions in the landscape. *Landscape Ecol.* 26: 461-472.
- WRB (2007) *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Primera actualización. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103, Roma. 117 pp.