



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Uso de *Agave Cupreata* Trel y Berger (Agavaceae) para el
control de la erosión en la localidad de El Peral,
Guerrero.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O
P R E S E N T A :

ELISA ROMERO MORATO



DIRECTORA DE TESIS: M. en C. IRENE
PISANTY BARUCH
2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A Inti con amor

A mis papas Francisco y Gloria

y a mi hermano Paco con mucho cariño.

Agradecimientos

A mi tutora Irene Pisanty, por guiarme en este camino, por su paciencia, porque además de ser una excelente asesora es una muy buena amiga.

A los sinodales que revisaron mi tesis: la Dra. Chirstina Siebe, el M. en C. Iván Castellanos, el Dr. Victor López, y el Dr. Ernesto Vega, por sus aportaciones y comentarios.

A Don Justino, Doña Christina y a Don Hermelindo por permitirme trabajar en sus parcelas y por la amabilidad con la que nos recibieron.

A Catarina Illsley, por su apoyo a lo largo del desarrollo de la tesis.

A Pilar Morales, Jorge García, Raquel Varela, Grisel Rivera, Albino Tlacotempa, Juana Flores, y a todo el personal de Gea y de Sansekan Tinemi por su apoyo en las salidas de campo, por la hospitalidad y amabilidad con la que nos recibieron.

A Pedro Eloy Mendoza Hernández y a Mariana Hernández Apolinar, técnicos académicos del laboratorio de Ecología especializada.

A los profesores del laboratorio de Ecología Especializada de la Facultad de Ciencias.

A los profesores del taller de Ecología Terrestre y Manejo de Recursos Bióticos.

Al profesor Jaime Zuñiga por enseñarme a realizar el bootstrap.

Fuera de las formalidades, a Inti por todo su amor y paciencia.

A mis papás por su cariño, por todo lo que me han enseñado, por apoyarme en todo, por todos los sacrificios que han hecho para que yo haya podido estudiar.

A mi hermano, por ser un gran hermano, por su cariño y apoyo.

A Rafa (yoga teacher) por su apoyo en el montaje de los cuadros de clavos y por haber hecho tan divertida esa salida al campo.

A Juanita, Eddy, Esperanza, Felicitas y Oscar por su compañía y apoyo en el campo.

A Copy, Cintita, Fanny, Gabriel, Jennifer, Adán, Cecilia, Mónica, Adrian y Gabriela, por acompañarme a Chilapa y por su ayuda en el trabajo de campo.

A Adán Miranda por su amistad, por haber hecho de la última salida la mejor.

A Aravid torres, por su amistad y por presentarme a mi querido Inti.

A mis amigas Cintita, Anel, Fanny y Ana por los buenos momentos que pasamos juntas.

A Chilapa y a El Peral por mostrarme como es realmente la vida en el campo.

Hoja de Datos del Jurado

- | | |
|---|---|
| 1. Datos del alumno | 1. Datos del alumno |
| Apellido paterno | Romero |
| Apellido materno | Morato |
| Nombre(s) | Elisa |
| Teléfono | 56897619 |
| Universidad Nacional Autónoma de México | Universidad Nacional Autónoma de México |
| Facultad de Ciencias | Facultad de Ciencias |
| Carrera | Biología |
| Número de cuenta | 406008336 |
| 2. Datos del tutor | 2. Datos del tutor |
| Grado | M. en C. |
| Nombre(s) | Irene |
| Apellido paterno | Pisanty |
| Apellido materno | Baruch |
| 3. Datos del sinodal 1 | 3. Datos del sinodal 1 |
| Grado | Dra. |
| Nombre(s) | Christina |
| Apellido paterno | Siebe |
| Apellido materno | Grabach |
| 4. Datos del sinodal 2 | 4. Datos del sinodal 2 |
| Grado | M. en C. |
| Nombre(s) | Iván Israel |
| Apellido paterno | Castellanos |
| Apellido materno | Vargas |
| 5. Datos del sinodal 3 | 5. Datos del sinodal 3 |
| Grado | Biól. |
| Nombre(s) | Victor |
| Apellido paterno | López |
| Apellido materno | Gómez |
| 6. Datos del sinodal 4 | 6. Datos del sinodal 4 |
| Grado | Dr. |
| Nombre(s) | Ernesto Vicente |
| Apellido paterno | Vega |
| Apellido materno | Peña |
| 7. Datos del trabajo escrito | 7. Datos del trabajo escrito |
| Título | Uso de <i>Agave cupreata</i> Trel y Berger (Agavaceae) para el control de la erosión en la localidad de El Peral, Guerrero. |
| Número de páginas | 66 p |
| Año | 2011 |

ÍNDICE

	Pág.
Agradecimientos	iii
Resumen	viii
1. Introducción	1
1.1 El suelo.....	1
Formación del suelo.....	2
Pérdida de suelo.....	4
Recuperación de suelo.....	7
1.2. El género Agave	9
Historias de vida del género Agave.....	10
Uso de los agaves	10
Uso de agaves en la conservación del suelo.....	12
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo general.....	14
2.2 Objetivos particulares	14
3. Hipótesis	14
4. Método.....	15
4.1 Área de estudio.....	15
4.1.1 Localización y características físicas	15
4.1.2 Condiciones sociales	18
4.1.3 Uso sustentable y organizaciones civiles y sociales	19
4.2 Especie de estudio	20
4.2.1 Descripción botánica y ecológica.....	20
4.2.2 Distribución geográfica.....	21
4.2.3 Manejo	22
4.3 Métodos.....	23
4.3.1 Supervivencia	23
4.3.2 Análisis estadístico	24
4.3.3 Supervivencia estacional	25

4.3.4	<i>Análisis de crecimiento</i>	25
4.3.5	<i>Proyección de la población de Agave cupreata</i>	26
4.3.6	<i>Simulaciones de la población de Agave cupreata</i>	26
4.3.7	<i>Retención de suelo</i>	27
4.3.8	<i>Análisis estadístico</i>	30
5.	Resultados	30
5.1	Estructura de la población de agaves	30
5.2	Supervivencia	31
5.2.1	<i>Tasa de supervivencia</i>	31
5.2.2	<i>Supervivencia estacional</i>	32
5.2.3	<i>Análisis estadístico</i>	33
5.3	Análisis de crecimiento	36
5.3.1	<i>Análisis anual</i>	36
5.3.2	<i>Análisis después de 16 meses</i>	38
5.3.3	<i>Análisis estacional</i>	38
5.3.4	<i>Proyección de la población de Agave cupreata</i>	40
5.3.5	<i>Simulaciones de la estructura de la población de Agave cupreata</i>	41
5.4	Características físicas del suelo	42
5.5	Erosión y sedimentación	43
5.5.1	<i>Erosión y sedimentación media neta bimestral y anual</i>	43
5.5.2	<i>Precipitación, erosión y sedimentación</i>	44
5.5.3	<i>Correlación entre el cambio anual en el espesor del mantillo y la textura, la pendiente, la distancia al agave más cercano y el tamaño del agave más cercano.</i>	45
6.	Discusión y conclusiones	46
6.1	Supervivencia	46
6.1.1	<i>Diferencia entre categorías</i>	46
6.1.2	<i>Efectos estacionales</i>	48
6.1.3	<i>Entrada de animales a las parcelas</i>	48
6.2	Crecimiento	49
6.3	Proyección de la población de <i>Agave cupreata</i>	50
6.4	Simulaciones de la estructura inicial de la población	52

6.5 Retención del suelo	53
6.5.1 <i>Diferencia entre estaciones</i>	53
6.5.2 <i>Índice de erosión y sedimentación anual</i>	54
6.5.3 <i>Relación entre el cambio anual en el espesor del mantillo y textura, pendiente, distancia al agave más cercano y tamaño del agave más cercano.</i>	56
6.5.4 <i>Patrón de introducción de los agaves</i>	57
Conclusiones	58
Literatura citada	59

Resumen

En este trabajo se analiza la introducción de *Agave cupreata* para retener el mantillo en suelos erosionados de El Peral, Guerrero. El estudio y comparación de la supervivencia y el crecimiento de acuerdo al tamaño de las plantas nos permitió determinar su viabilidad para estos fines y dar recomendaciones sobre el tamaño y la forma en la que deben ser introducidos. El monitoreo del espesor del mantillo y su posterior análisis nos permitió determinar que la presencia de agaves disminuye la variación del espesor del mismo. Se monitorearon durante un año agaves de diferentes tamaños en dos parcelas, en una de ellas los agaves fueron plantados 4 años antes de comenzar este estudio, mientras que en la otra parcela habían sido introducidos 4 meses antes. Se tomaron medidas bimestrales de número de hojas y de la altura de los agaves. Se categorizó a los individuos de acuerdo a su altura y al número de hojas, y se analizó el crecimiento y la supervivencia por categoría mediante un modelo matricial.

La categoría tres (más de 10 cm de altura y más de 5 hojas) presentó la mayor tasa de supervivencia. En temporada de lluvias se incrementó la probabilidad de transición a categorías superiores, mientras que en temporada de secas aumentó la retrogresión. La permanencia en todas las categorías fue el proceso demográfico más importante en ambas temporadas y en las dos parcelas. A través de matrices de proyección y con base en los valores obtenidos a partir de las dos parcelas consideradas se simuló el comportamiento que tendrían los agaves en cada parcela si se introdujeran únicamente individuos de cada una de las categorías. Los resultados de este modelo muestran que las probabilidades de supervivencia y de crecimiento de las primeras categorías son menores que las de las últimas, especialmente en la parcela nueva. Se tomaron medidas bimestrales de la pérdida o

acumulación de mantillo mediante cuadros de clavos marcados, dispuestos aleatoriamente en ambas parcelas, en los que además se registró la presencia o ausencia de agaves. En general, la tendencia es a la sedimentación más que a la erosión. Los resultados indican que la presencia de agaves contribuye a disminuir la variación en el espesor del mantillo, sobre todo cuando la cubierta herbácea es escasa.

1. Introducción

1.1 El suelo

Los suelos son una parte fundamental de los ecosistemas y constituyen uno de los servicios ambientales de soporte más importantes (Millenium Ecosystem Assessment, 2003). Los suelos son el sustrato en el que crecen las plantas, a las que suministran nutrientes, y en ellos se realiza la mayoría de los ciclos biogeoquímicos más importantes (Cotler y Ortega-Larrocea, 2006; Barrios, 2007; Cram *et al.*, 2008). La degradación de los suelos es uno de los problemas más severos de la crisis ambiental contemporánea (PNUMA, 2000). En América Latina la pérdida de suelos es motivo de alarma, y México no es excepción alguna (PNUMA, 2010). El suelo es considerado un recurso natural no renovable debido a que su regeneración natural abarca períodos muy prolongados de tiempo. Además, es difícil y costoso recuperarlo o mejorar sus propiedades después de que ha sido erosionado o deteriorado física y químicamente (Lal *et al.*, 1997).

El suelo se define como la capa más externa de la corteza terrestre, y su grosor varía desde unos cuantos centímetros hasta más de tres metros (Pritcnnett, 1991). El suelo es un sistema trifásico, con una fase sólida, una líquida y una gaseosa. La fase sólida es porosa y está constituida por partículas minerales. Los poros se llenan con las fases líquida y gaseosa. La fase líquida es principalmente agua de precipitación que se encuentra a modo de película rodeando a las partículas de la fase sólida, y ocupa los poros más pequeños. Los poros más grandes están rellenos con gases a menos que se encuentren saturados por agua. Existe un intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera, porque hay una continua difusión de

oxígeno de la atmósfera al suelo y de dióxido de carbono del suelo a la atmósfera. La proporción de las tres fases varía con el tiempo y el sitio (Foth y Turk, 1978). El suelo comprende típicamente diversas capas u horizontes de material, las capas son paralelas a la superficie de la tierra, y juntas forman el perfil del suelo (Charman y Murphy, 2007). Los perfiles de los suelos se desarrollan de diferente modo debido a los efectos de los factores formadores del suelo.

Formación del suelo

La formación del suelo comienza simultáneamente con la intemperización de las rocas. La intemperización (o meteorización) es la acción de fuerzas químicas, físicas y biológicas que actúan sobre las rocas y ocasionan inicialmente la formación de pequeñas fracturas que con el tiempo se van extendiendo en profundidad y las van desintegrando, con lo que dan lugar a la formación del material parental en el que se inicia el proceso de formación del suelo (Aguilera, 1989). Los procesos de intemperización del suelo son destructivos, mientras que los procesos de formación son constructivos (Tamhane *et al.*, 1986). En algunas ocasiones el suelo se forma directamente a partir de la intemperización de la roca (*in situ*), mientras que en otras el suelo se forma a partir de materiales que han sido transportados y depositados (Charman y Murphy, 2007).

En la formación del suelo actúan de manera simultánea cinco factores, que son el material parental, el clima, los organismos, el relieve (topografía) y la edad del suelo (Aguilera, 1989). Estos factores no siempre son de igual importancia en la formación del suelo y, dependiendo de la ubicación geográfica del sitio, algunos de ellos tienen más influencia para determinar la naturaleza del desarrollo del suelo bajo un conjunto específico de condiciones (Tamhane *et al.*, 1986).

La clase de suelo que se desarrolla depende del tipo de roca originaria y del material de origen, y esos aspectos también influyen en las propiedades físicas y químicas del suelo resultante (Charman y Murphy, 2007). El clima interviene en la formación del suelo en gran parte mediante la precipitación y la temperatura. La precipitación regula fundamentalmente el régimen de humedad y aire del suelo, y determina las tendencias predominantes en la configuración del mismo. También la precipitación afecta su desarrollo a través de la erosión, dando como resultado suelos delgados en pendientes pronunciadas y el depósito del material del suelo en la parte baja de la colina. La temperatura afecta la velocidad de las reacciones químicas e influye en la descomposición de la materia orgánica y en las actividades microbiológicas del suelo (Tamhane *et al.*, 1986). La topografía influye en la cantidad de agua disponible para el deslave de las rocas, formación de nuevos minerales, lixiviación y translocación de coloides. La vegetación, los microorganismos, los animales y las actividades humanas influyen en gran medida en los procesos de formación de suelos. Las raíces de las plantas agregan materia orgánica y forman pequeños canales en el suelo. Estos canales mejoran la estructura del suelo y sus condiciones generales, lo que permite el crecimiento de las plantas. Las raíces también ayudan a mantener unidas las partículas del suelo. La fauna del suelo puede mejorar en gran medida la estructura del mismo mediante la ingestión de partículas edáficas, tejido vegetal y animal, y materia orgánica acumulada en el mantillo, y su posterior excreción. Los microorganismos del suelo juegan un papel fundamental en la descomposición de la materia orgánica y en el ciclo del nitrógeno, que implica interacciones entre la atmósfera, las plantas y el suelo. La madurez del suelo depende, en parte, del tiempo en el que han ocurrido los procesos de su formación (Charman y Murphy, 2007).

La interacción conjunta de los diversos factores formadores del suelo bajo diferentes condiciones establece una dirección para determinados procesos de formación del suelo. El resultado de la formación del suelo lleva a su configuración, es decir, a las proporciones de diferentes componentes (limo, arena, arcilla) representadas en él.

Pérdida de suelo

Degradación del suelo

El estado del ambiente en México se ha vuelto una preocupación constante para diversos sectores de la sociedad debido al gran deterioro que ha presentado en las últimas décadas. Uno de los factores que intervienen en el deterioro ambiental es el incremento de la desigualdad social. El crecimiento de la población humana y el acceso inequitativo a los recursos que ocasiona el sobreconsumo por una parte de la población y la apenas subsistencia por la otra ha incrementado la explotación del suelo para diversas actividades y ha sido la causa principal de la deforestación global y del cambio de uso de suelo para actividades agropecuarias, silvícolas y de crecimiento urbano (Lal *et al.*, 1997). En numerosas regiones de nuestro país las prácticas inadecuadas de explotación agrícola, pecuaria y forestal fomentadas a lo largo del tiempo, han ocasionado la destrucción de la cubierta vegetal y la pérdida de la capa superficial de los suelos (Elizalde, 1995; Landa *et al.*, 1997; Merino, 2004; Cotler *et al.*, 2010; Cotler y Martínez-Trinidad, 2010).

La realización de actividades agrícolas provoca alteraciones al añadir o extraer materiales del suelo. Los suelos pobres en materia orgánica se encuentran sometidos a degradaciones intensas por parte de los factores externos, mientras que los suelos que disponen de una cubierta vegetal adecuada presentan más resistencia y mayor resiliencia ante los disturbios (Seoáñez *et al.*, 1999). Los sistemas agrícolas, definidos como el conjunto de sistemas de

labranza y manejo de los cultivos y sus residuos, tienen un gran impacto en las propiedades físicas del suelo (FAO, 2000).

La degradación del suelo es la pérdida de la productividad o utilidad real o potencial, como resultado de factores naturales o antropogénicos y se resume en el declive de su calidad, la reducción de su productividad y de su capacidad regulatoria del ambiente (Syers, 1997). El estado de degradación que un suelo presenta depende tanto de su resiliencia como del tipo, la intensidad, la frecuencia y, finalmente, del grado del disturbio, al que se le somete. La resiliencia de un suelo se refiere a su capacidad para recuperarse después de un disturbio natural o antropogénico (Eswaran, 1994; Lal *et al.*, 1997). Los procesos de resiliencia del suelo incluyen a los mecanismos que determinan su capacidad de recuperarse y la tasa de recuperación, entre ellos se encuentran las tasas de formación y la de agregación de suelo, la acumulación de carbón orgánico del suelo (SOC por sus siglas en inglés), la circulación y transformación de nutrientes, la lixiviación del exceso de sales y el incremento en la biodiversidad, incluyendo la sucesión de especies (Eswaran *et al.*, 2001). La resiliencia está determinada por las características físicas y bióticas que determinan la tasa, el patrón y el camino de la recuperación, e incluyen aspectos tan importantes como las características del terreno, la calidad del suelo, la posición en el paisaje, el material parental, el balance hídrico, el clima, la vegetación y la diversidad del suelo (Lal *et al.*, 1997).

La degradación del suelo se puede clasificar por su origen en tres tipos: la física, la química y la biológica. La degradación física está conformada por fenómenos como la compactación, la erosión y la escorrentía. Actualmente estos procesos son originados, y se ven acelerados, por diversos factores económicos, culturales y sobre todo de estilos de desarrollo, que han ocasionado un intenso cambio de uso del suelo (Eswaran *et al.*, 2001).

La degradación química del suelo se debe a los fenómenos de salinización debidos al riego con aguas de baja calidad, a la carencia o abundancia excesiva de nutrientes y materia orgánica, a la acidificación del suelo y a la acumulación excesiva de productos tóxicos. Por último, la degradación biológica del suelo se debe en su mayor parte a fenómenos de pérdida de biodiversidad y al empobrecimiento de la microflora y microfauna (Seoánez *et al.*, 1999).

La degradación de los suelos agrícolas ocurre en tres etapas (Mielniczuk y Schneider, 1984):

Etapa 1. Las características originales del suelo son destruidas de manera gradual, debido a la baja intensidad de los procesos y al mantenimiento de la productividad por el uso de correctivos y fertilizantes; la degradación es poco perceptible.

Etapa 2. Ocurren pérdidas grandes y notorias de la materia orgánica del suelo, y se produce gran daño en su estructura. Se presenta encostramiento superficial y compactación subsuperficial. La compactación superficial impide la infiltración del agua y la penetración de raíces.

Etapa 3. El suelo presenta un gran daño, el espacio poroso está altamente colapsado, la erosión es acelerada y la productividad decae a niveles mínimos. El tiempo en el que se llega a la tercera etapa de degradación depende de la textura del suelo y su resistencia a la erosión del manejo y de la pendiente de la parcela.

Erosión

La erosión del suelo es el desgaste o pérdida del mismo, y debido a lo frecuente que es y a la gran superficie que abarca actualmente es considerada como uno de los mayores problemas ambientales a nivel mundial. Actualmente, la tasa de erosión del suelo excede a

la tasa de formación del mismo en numerosas áreas, lo que resulta en su agotamiento, así como en la pérdida de los servicios ambientales que presta (Pimentel *et al.*, 1995a). Los procesos de erosión alteran algunas propiedades del suelo como la dureza, la capacidad de infiltración y la productividad (Hudson, 1982).

La erosión que se presenta cuando la superficie de la tierra y la cubierta vegetal natural no han sido alteradas por las actividades humanas se llama erosión geológica y es un proceso muy lento. La erosión acelerada generalmente es resultado de actividades humanas que perturban la cubierta vegetal y exponen a los suelos a fuerzas físicas (Foth y Turk, 1975).

La susceptibilidad de un sitio a presentar erosión es influida por la textura del suelo, pedregosidad,, longitud y grado de la pendiente y patrones de lluvia y viento (Aguilera, 1989). Los tres factores más frecuentemente asociados a la erosión edáfica son el agua, el viento y las actividades humanas como la agricultura y la ganadería. La erosión hídrica es ocasionada por el agua y consiste en la separación de partículas del suelo, su transporte y su consecuente depósito (Charman y Murphy, 2007). La erosión eólica es el movimiento de las partículas del suelo ocasionado por el viento, y ocurre cuando las fuerzas de levantamiento del aire exceden a las fuerzas de gravedad y cohesión de las partículas superficiales del suelo (Hudson, 1982).

Recuperación de suelo

De acuerdo con la FAO (2000) hay nueve principios generales que deben ser considerados como lineamientos básicos para el desarrollo de estrategias de manejo de suelos:

- Aumentar la cobertura de los suelos.
- Aumentar la materia orgánica del suelo.

- Aumentar la infiltración y retención de humedad.
- Reducir la escorrentía.
- Mejorar las condiciones de enraizamiento.
- Mejorar la fertilidad química y la productividad primaria.
- Reducir los costos de la producción agrícola.
- Proteger las parcelas.
- Reducir la contaminación del suelo y del ambiente.

Las principales acciones realizadas para controlar la erosión son la protección mecánica mediante la construcción de estructuras y la protección biótica a través del aumento de la cobertura vegetal. Dentro de las primeras encontramos la construcción de zanjas desviadoras, terrazas acanaladas, cauces artificiales, bancales o terrazas, terrazas de irrigación, taludes a nivel, zanjas prado, resaltos alternados, cultivos a nivel, franjas de hierba de surcos y caballones entre otros (Hudson, 1982). A pesar del frecuente uso de estrategias mecánicas de retención, el aumento de la cobertura vegetal del suelo es el principio más importante en el manejo sostenible de los suelos (FAO, 2000). Una alternativa para mitigar la erosión en suelos con una incipiente degradación es la implementación de medidas preventivas o estrategias de recuperación mediante el establecimiento de especies vegetales que protejan al suelo de la acción de los agentes erosivos (Elizalde, 1995). La vegetación actúa como una capa protectora entre la atmósfera y la tierra (Morgan, 2005) y ofrece una protección física contra la escorrentía y la erosión (Hudson, 1982), además las raíces de las plantas penetran en áreas compactadas mejorando la estructura del suelo, la aeración, la filtración y la retención de agua (Pritcnnett, 1991). La cubierta vegetal genera microhabitats y modifica de forma notable las condiciones de

temperatura y humedad del suelo, ya que influye en la cantidad de agua que llega a su superficie, y en las pérdidas de agua como resultado de la evapotranspiración (Hudson, 1982). La cobertura vegetal, además, aumenta el contenido de materia orgánica de la capa superficial del suelo y su porosidad, favorece el control biológico de las plagas y reduce la entrada de especies invasoras y de las especies consideradas como malezas (FAO, 2000).

Morgan (2005) recomienda que al seleccionar vegetación para el control de la erosión se favorezca a:

- Especies nativas adaptadas al clima local y a las condiciones del suelo para asegurar la integridad ecológica local.
- Especies con disponibilidad de semillas y plantas.
- Especies con bajo riesgo de incendio.
- Especies con propiedades adecuadas en el control de la erosión.

1.2. El género Agave

El género *Agave* pertenece a la familia Agavaceae. Su nombre proviene del griego y significa “admirable”, y fue descrito inicialmente por Linneo en 1753. Se distribuye principalmente en las zonas áridas y semiáridas de América del Norte (García-Mendoza, 1992).

Las especies del género *Agave* constituyen una parte importante de la biodiversidad mexicana. En México existe el 75% de las 166 especies reportadas en el continente americano (García-Mendoza, 2002), por lo que nuestro país es considerado como el centro de origen del género. La familia Agavaceae es de gran importancia biológica, ecológica y

económica para el país (Granados, 1993; Bruman, 2000; Colunga García-Marín y Zizumbo-Villareal, 2006).

Historias de vida del género Agave

El género *Agave* contiene numerosas especies semélparas perennes (Eguiarte y Búrquez, 1987). Las especies de este género alcanzan su fase reproductiva en periodos de tiempo relativamente largos, como es el caso de *Agave americana*, cuya edad reproductiva es aproximadamente 15 años (Gentry, 1982; Granados, 1993; Nobel, 1988), y de *Agave cupreata*, que la alcanza en aproximadamente 7 años (García-Meneses, 2004; Illsley *et al.*, 2007).

Los agaves son plantas de lento crecimiento y abundante producción de semillas, que en general germinan fácilmente al contar con la humedad suficiente (García-Meneses, 2004). Sin embargo, como sería de esperarse por el tipo de hábitat en el que se encuentran, el establecimiento de plántulas es relativamente poco frecuente en condiciones naturales, y generalmente se da en micrositios de distribución discontinua, lo que se expresa en una distribución agregada en manchones en los sitios en los que las condiciones prevalecientes permitieron tanto la germinación de la semilla como el crecimiento y desarrollo de individuos nuevos (Nobel, 1979).

Uso de los agaves

Durante el florecimiento de las culturas mesoamericanas, las agavaceas fueron usadas como fuentes de combustible, forraje, fibra para el vestido, medicina, bebida (aguamiel, pulque, tequila y mezcal), muebles, construcción (utilizando el escapo) y fabricación de implementos agrícolas. También tienen usos religiosos y de ornato. Los nahuas realizaban

un uso integral de los magueyes, pues utilizaban desde las raíces hasta las semillas y cada órgano de la planta recibía un nombre particular. Cuando los españoles llegaron a México en el siglo XVI, quedaron sorprendidos por el uso que los indígenas daban a los magueyes, y debido a que se usaban todas sus partes los bautizaron como “árbol de las maravillas” (García-Mendoza, 1992). En la actualidad aun se mantienen 70 formas de uso, entre las que destacan por su importancia las bebidas fermentadas o destiladas y la obtención de fibras. A una menor escala, los agaves aún se emplean en la construcción y como alimento, además de usarse como ornato y como plantas medicinales (García-Mendoza, 1992; Delgado, 2007; Eguiarte y Souza, 2007; Illsley *et al.*, 2007).

Un grupo de especies de este género, conocido en numerosas regiones de México como “mezcales” (del nahuatl “metl” = agave, e “ixcali”= cocido), se encuentra entre las plantas alimentarias más importantes y más ampliamente utilizadas en las regiones del trópico seco de México y Centroamérica (Bruman, 2000).

La historia de diversificación de los agaves bajo cultivo y selección humana puede ser dividida en tres periodos principales:

- 1) Su uso como alimento, que data de al menos hace 11,000 años.
- 2) Su uso en la elaboración de bebidas fermentadas en la época prehispánica.
- 3) Su uso en la elaboración de bebidas destiladas, que comenzó a finales del siglo XVI.

En el siglo XVI se trajo la técnica de destilación de Europa y aparentemente también de las Filipinas a México, y dio como resultado dos bebidas alcohólicas destiladas elaboradas con agaves: el mezcal y el tequila (Nobel, 1998). El uso de esta técnica se ha extendido hasta la actualidad, y ha registrado un considerable crecimiento comercial durante los últimos 50 años (Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 2006). La producción de mezcal y

tequila se inicia con las cabezas o piñas del agave, pero tiene variantes dependiendo de las especies utilizadas, la tecnología empleada y las localidades en las que se prepara (Nobel, 1998).

Uso de agaves en la conservación del suelo

Las características morfológicas que hacen a los agaves una excelente opción para su uso en acciones de conservación del suelo se describen a continuación.

Las raíces de los agaves son superficiales, relativamente rectas y se originan en la base del tallo, tienden a ser delgadas (generalmente < 4 mm de diámetro) y tienen pocas raíces laterales más delgadas. Las raíces superficiales y fasciculadas permiten la absorción de la precipitación, por escasa que sea, y la retención del suelo (Nobel, 1998). Las hojas colectan el agua a manera de canales imbricados, y la dirigen a la base del tallo. Bajo las plantas, el suelo de esta zona está sombreado, con una consecuente reducción de la evapotranspiración (Gentry, 1982).

Se ha registrado que las características de las raíces y las hojas de los agaves han permitido su uso en diversos sistemas agrícolas para captación de humedad atmosférica y para mantener el suelo en terrenos con alta pendiente (Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2007). El carácter perenne y el poco cuidado que demandan estas plantas son ventajosos para su manejo. Además, el esfuerzo que implica para los campesinos introducirlos y mantenerlos se ve recompensado en un tiempo relativamente corto después del cual pueden obtener ingresos económicos con la venta del mezcal.

Desde la época prehispánica, el maguey, además de cultivarse para fines alimentarios, se cultivó como una medida para proteger a las tierras contra la erosión (Rivera, 1990), práctica que continúa hasta nuestros días (Rivera, 1990; Zizumbo-Villarreal y Colunga-

GarcíaMarín, 1993).El Grupo de Estudios Ambientales (GEA) y la Organización de Seguridad Social Sanzekan Tinemi decidieron, junto con algunos propietarios de la comunidad de El Peral (Gro.), introducir *Agave cupreata* para la recuperación de suelos erosionados en esta comunidad debido a que la especie es nativa de la región, por lo que se encuentra bien adaptada a las condiciones del suelo y a las condiciones climáticas. Al elegir esta especie también consideraron el valor económico que tiene en la región, y que al cabo de unos años el esfuerzo de plantarla en los suelos erosionados habría de ser redituable monetariamente.

Agave cupreata presenta gran resistencia a condiciones climáticas y edáficas que caracterizan al sitio de estudio, y tiene características morfológicas adecuadas para el control de la erosión como el tipo de raíces y la forma en la que se disponen sus hojas, además de que es una especie naturalmente abundante en la zona. Adicionalmente, es una especie importante tanto cultural como económicamente para las comunidades de la región, con una larga historia de uso.

En la actualidad, los agaves representan el principal recurso natural que genera ingresos para miles de familias en extrema pobreza en las zonas del trópico seco de México (GEA, 2008). En el estado de Guerrero está aumentando el uso de *A. cupreata*, principalmente de poblaciones silvestres, aunque en algunas regiones es reproducida en viveros y trasplantada una vez que alcanza un año de edad, y su manejo se está estableciendo con mayor frecuencia (Eguiarte y Souza, 2007; Illsley *et al.*, 2007).

Aunque muchos trabajos reportan el uso de *A. cupreata* con fines de control de la erosión, no existen en la literatura evaluaciones de la eficacia de estos esfuerzos. De igual manera

no existen trabajos previos en parcelas bajo condiciones físicas, biológicas y socioeconómicas similares a las presentes en el sitio de estudio.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la introducción de *A. cupreata* en la comunidad de El Peral, Municipio de Chilapa de Álvarez (Guerrero), como una alternativa viable para la retención de suelos degradados por causas naturales y antropogénicas.

2.2 Objetivos particulares

1. Evaluar la acumulación de mantillo después de un año en las dos parcelas manejadas por la comunidad de El Peral, Gro. en las que se han introducido agaves provenientes de viveros locales
2. Evaluar la dinámica poblacional de *A. cupreata* en las parcelas, con base en la supervivencia y el crecimiento, y considerando las categorías de tamaño de los agaves introducidos.
3. Determinar la relación entre la pendiente, el porcentaje de limo, arcilla y arena, la distancia al agave más cercano, el tamaño del agave más cercano con el cambio en el espesor del mantillo.

3. Hipótesis

3.1 La introducción de *A. cupreata* en terrenos erosionados por causas antropogénicas y naturales contribuirá a aminorar la erosión y a recuperar la capa superficial rica en materia

orgánica (mantillo); además representará una alternativa viable de manejo dado el valor económico de los agaves.

3.2 Los individuos de *A. cupreata* de mayor tamaño tendrán mayor probabilidad de supervivencia y contribuirán en mayor medida a retener el suelo.

3.3 Existirá una relación positiva entre el grado de la pendiente, el porcentaje de limo, la distancia al agave más cercano y su tamaño con el cambio en el espesor del mantillo.

4. Método

4.1 Área de estudio

4.1.1 Localización y características físicas

La localidad de El Peral está situada en el Municipio de Chilapa de Álvarez, en el estado de Guerrero. a 1852 m de altitud, a 17° 34' 20" de latitud N y a 99° 14' 59" W (INEGI, 2005). Se encuentra ubicada en la subcuenca Chilapa-Zitlala, perteneciente a la Cuenca del Balsas (Fig.1).

En El Peral predominan las rocas calizas, lutitas y areniscas; el tipo de suelo dominante es Rendzina y la vegetación principal es bosque de encino, aunque ha sido sustituido en grandes extensiones por agricultura de temporal (INEGI, 1987; INEGI, 1999). De acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1987), el clima es semicálido subhúmedo con lluvias en verano (A(C)w₁(w)).

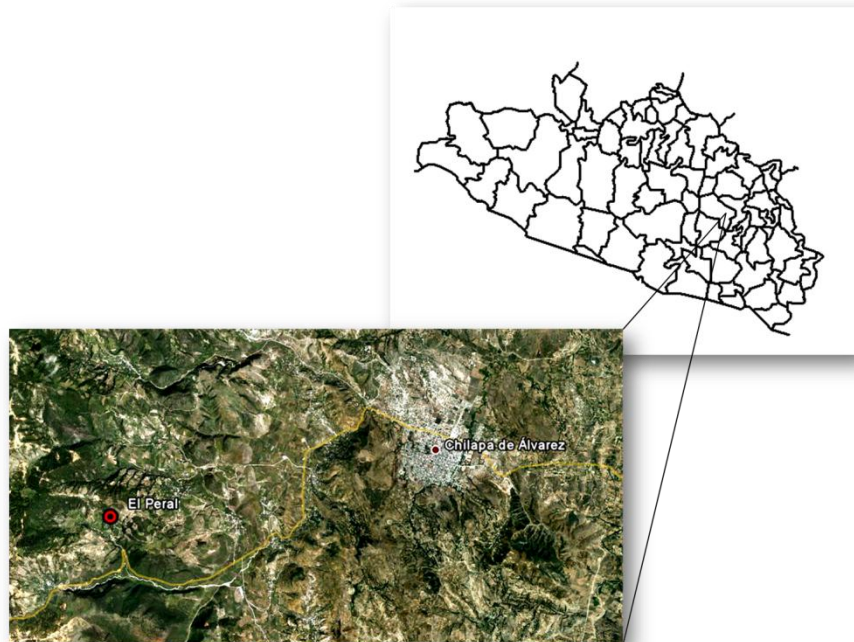


Fig. 1 Ubicación de El Peral (punto rojo) en el estado de Guerrero. (Fuente: Google Earth 2010).

El trabajo se desarrolló en dos parcelas. La primera de ellas es un predio en el que se sembraba maíz, cuyo dueño lo vendió a la comunidad hace aproximadamente 10 años, ya que las malas prácticas agrícolas, agravadas por la pendiente del terreno, lo volvieron improductivo debido a la severa erosión del suelo. En esta parcela, los miembros de esta comunidad que son parte de la cooperativa Sansekan Tinemi decidieron intentar retener el suelo con la introducción de *A. cupreata*, por lo que se refieren a este predio como parcela demostrativa, nombre que conservaremos para este estudio. La parcela demostrativa se localiza El Peral entre los 1911 y 1923 m de altitud, mide 5,772.15 m², tiene una pendiente de 66% y sus cuatro márgenes se encuentran a 17°34'23"N y a 99°14'44"W, a 17°34'22"N y 99°14'41"W, 17°34'20"N y 99°14'44"W, y por último a 17°34'21"N y 99°14'46"W (Fig. 2). En el 2004 la parcela fue cercada con alambre de púas a fin de protegerla y se

introdujeron cerca de 4000 agaves. En 2005 se hicieron zanjas alrededor de ella para desviar el agua de lluvia a modo de evitar que el suelo fuera arrastrado por la ladera.



Fig. 2 Localización de la parcela demostrativa en la localidad de El Peral, Municipio de Chilapa de Álvarez, Gro. (p1: límite norte, p2: límite este, p3: límite sur, p4: límite oeste) (Fuente: Google Earth 2010).

La segunda parcela presenta el mismo problema que la demostrativa, y se le denominó parcela nueva porque el tratamiento se inició aproximadamente 3 años después que en la demostrativa; se localiza entre los 1910 y 1935 m de altitud. Mide 6374.80 m², tiene una pendiente de 34% y sus márgenes se encuentran a 17°34'26"N y a 99°14'56"W, 17°34'26"N y 99°14'56"W, 17°34'26"N y 99°14'59"W y, por último, a 17°34'27"N y 99°14'58"W (Fig. 3). En el 2008 la parcela fue cercada con alambre de púas, se hicieron zanjas para desviar los escurrimientos del agua de lluvia, y se introdujeron cerca de 500 agaves. Debido a lo irregular de la forma y el terreno en la parcela nueva, y a que los agaves se introdujeron sólo en una parte, se tomó sólo una zona de 2263 m² para realizar el estudio.

En ambas parcelas los agaves se introdujeron formando hileras irregulares, paralelas a la pendiente.



Fig.3 Localización de la parcela nueva en la localidad de El Peral, Municipio de Chilapa de Álvarez, Gro. (p1: límite noreste, p2: límite sureste, p3: suroeste, p4: límite noroeste) (Fuente: Google Earth 2010).

4.1.2 Condiciones sociales

La comunidad de El Peral está compuesta de 249 habitantes (119 hombres y 130 mujeres) (INEGI, 2005). La población vive en condiciones de pobreza y la mayor parte de la gente es analfabeta. Las condiciones de salud y los servicios públicos son muy precarios, y aunque la localidad cuenta con energía eléctrica, pero carece de servicios de drenaje, agua potable, teléfono y transporte.

La economía de las familias de la región se basa en la agricultura de subsistencia, el pastoreo extensivo y en la extracción de plantas útiles tanto para su uso directo como para su venta (Illsley *et al.*, 2007). Dos especies vegetales que poseen una gran importancia en la región son *A. cupreata*, debido a su uso para la producción de mezcal, la obtención de

fibras, fructuosa y saborizantes, y a su venta como planta de ornato, y la palma *Brahea dulcis* con cuyas hojas previamente secadas se producen diferentes objetos de utilidad cotidiana y se realizan diversas artesanías.

4.1.3 Uso sustentable y organizaciones civiles y sociales

El Grupo de Estudios Ambientales (GEA) es una organización civil que se originó en 1977 con la finalidad de contribuir a las prácticas sustentables y, con ello, a incrementar el nivel de vida de los grupos campesinos y a resolver problemas socioambientales. En nuestra zona de estudio, GEA se ha encargado de realizar estudios sobre la biología, ecología y etnobotánica de *A. cupreata*, a impulsar la producción y comercialización de mezcal tradicional de alta calidad, y más recientemente a desarrollar planes de manejo específicos para algunas comunidades que incluyen, por ejemplo, la protección de los murciélagos dado que son los polinizadores más importantes de los agaves (García-Meneses, 2004; Illsley *et al.*, 2007; GEA, 2008).

La Sociedad de Solidaridad Social “Sansekan Tinemi” es una cooperativa que se formó en el Municipio de Chilapa de Álvarez en 1990. Tiene un programa de reforestación y recursos naturales encaminado al uso sustentable, en el que se desarrolla un programa de producción y plantación de maguey mezcalero. En dicho programa participan activamente 13 comunidades y alrededor de 4900 personas (S. S. S. “Sansekan Tinemi”, 2008). Esta cooperativa, que en sus orígenes tendía a proporcionar insumos agrícolas accesibles a los cooperativistas, ha ampliado sus alcances hacia medidas de sustentabilidad que tienen impactos muy importantes en el manejo de sus recursos naturales en general, y de los agaves en particular.

El trabajo conjunto de GEA y de la cooperativa ha permitido: 1) incrementar la producción de mezcal a través de la introducción de agaves producidos en viveros a partir de semillas de plantas nativas de región, 2) garantizar la calidad del mezcal producido localmente, 3) tramitar su denominación de origen, y 4) introducirlo comercialmente como producto sofisticado en zonas urbanas, como la Ciudad de México (C. Illsley y P. Morales, com. pers.), con lo que se han abierto nuevos mercados para un producto que tradicionalmente era de consumo local y para las zonas campesinas mezcaleras y que carecía de control de calidad.

4.2 Especie de estudio

4.2.1 Descripción botánica y ecológica

Agave cupreata (Fig. 4), conocido localmente como “papalometl” o “agave mariposa”, es una especie endémica de la Cuenca del Balsas (Illsley *et al.*, 2007), presenta rosetas simples, caulescentes, de tamaño mediano, verde claro brillante. Sus hojas son lanceoladas, de 40 a 80 cm por 18 a 20 cm, con margen serrado y muy estrechas en la base, gruesas carnosas, de planas a ligeramente cóncavas en la parte superior. El panículo es de 4 a 7 m de alto, con flores naranja-amarillo de 50 a 60 mm de longitud en umbelas difusas, con pedicelos bracteolados oscuros, ovario de 30 a 35 mm de longitud, verde olivo, fusiforme, y tépalos subiguales, erectos, lineales-lanceolados (Gentry, 1982).



Fig. 4. *Agave cupreata*.

Este agave florece y fructifica durante el largo periodo de secas, que abarca de principios de otoño a principios de verano (Gentry, 1982). El periodo de crecimiento que antecede a la madurez sexual de la especie en la zona de estudio es de siete años aproximadamente (García Meneses, 2004; Illsley *et al.*, 2007). *A. cupreata* no produce vástagos vegetativos, por lo que depende completamente de la producción de semillas para establecerse y para dispersarse, así como para que su población se expanda en un sitio dado. Su reproducción se caracteriza por un sistema de entrecruzamiento alógamo, que implica polinización obligada y, consecuentemente, una dependencia total de polinizadores para la reproducción (Illsley *et al.*, 2007). La polinización nocturna, especialmente la llevada a cabo por los murciélagos, es la que más influye en el proceso reproductivo, aunque muchos de los visitantes diurnos también juegan un papel importante en él (García-Meneses, 2004; Illsley *et al.*, 2007).

4.2.2 Distribución geográfica

Agave cupreata se encuentra ampliamente distribuido en la base de las laderas montañosas en la cuenca del Río Balsas, en Michoacán y Guerrero, entre los 1220 y 1850 m s.n.m.

(Fig.5). Habita en la zona intertropical, en regiones donde no se presentan heladas, con una precipitación media anual de 73 a 86 mm, que se presenta entre mayo y noviembre (Gentry, 1982).

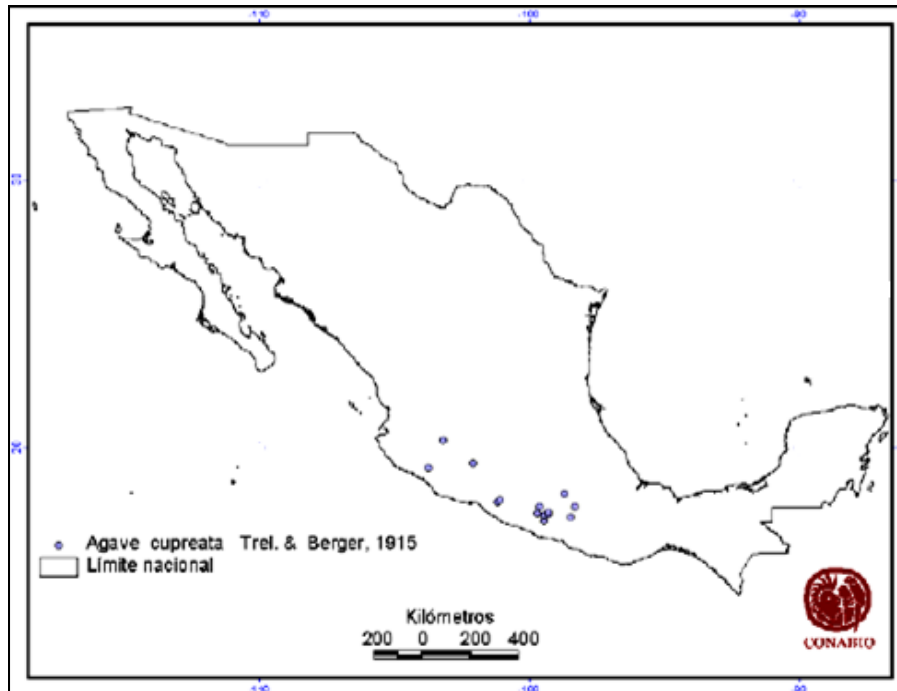


Fig. 5 Distribución geográfica de *A. cupreata* en la República Mexicana.

4.2.3 Manejo

En El Peral, *A. cupreata* se encuentra bajo tres principales modalidades de manejo: (1) extensivo, (2) intensivo de semilla regada, y (3) de vivero y repoblamiento. El manejo extensivo y el intensivo de semilla regada son modalidades que han sido practicadas en la región de Chilapa por cientos de años, mientras que el manejo de vivero y repoblamiento surgió en la última década del siglo XX (Hillsley *et al.*, 2007).

4.3 Métodos

4.3.1 Supervivencia

En la parcela demostrativa se trazaron cinco transectos que cruzan toda la parcela, en el sentido de la pendiente. La posición de los transectos fue elegida aleatoriamente; el transecto uno midió 50×3 m, el dos 47.4×3 m, el tres 47×3 m, el cuatro 50×3 m y el cinco 47×3 m. Se marcaron todos los agaves (N= 569 individuos) correspondientes a cada transecto, y se midió la altura y el número de hojas de cada individuo, y posteriormente estos parámetros se midieron bimestralmente en el periodo de octubre de 2008 a febrero de 2010.

En la parcela nueva todos los individuos habían sido trasplantados en junio de 2008. La distribución de los agaves fue más irregular que en la demostrativa, por lo que se marcaron todos los individuos presentes en dos zanjas (171), así como 330 individuos escogidos aleatoriamente en una porción del terreno. Los agaves se marcaron de igual manera que en la parcela demostrativa, y se tomaron medidas bimestralmente entre octubre de 2008 y febrero de 2010.

Con base en un trabajo previo (Martin, 2008), se realizó una categorización mixta de altura y número de hojas (Tabla 1).

Tabla 1. Categorías de tamaño de *A. cupreata* en las parcelas de El Peral, Gro

Categoría de tamaño	Características
Juvenil I (1)	De 1 a 5 hojas
Juvenil II (2)	Más de 5 hojas y menos de 10 cm de altura
Juvenil III (3)	Entre 10 y 40 cm de altura

Con la información obtenida se elaboró un histograma de frecuencias de categorías de tamaño para cada bimestre. Además, se calcularon las tasas de supervivencia anual y a los 16 meses para cada categoría de tamaño en cada uno de los predios.

Las tasas de supervivencia fueron calculadas con la fórmula

$$l_x = N_{x+1} / N_{x0}$$

donde l_x = supervivencia

N_{x+1} = número de individuos en $x+1$

N_{x0} = número inicial de individuos

4.3.2 Análisis estadístico

El estimador de Kaplan-Meier es un método descriptivo para estimar la distribución de los tiempos de supervivencia de una muestra. El análisis de comparación de la supervivencia de dos muestras o grupos proporciona una ordenación jerarquizada de ésta, y el valor Z correspondiente permite evaluar la significancia estadística. En el caso de la comparación de muestras o grupos múltiples el análisis asigna a cada tiempo de supervivencia un valor y a partir de las sumas de los valores asignados ejecuta una X^2 (Keiding, 2006; Borgan, 2006; Stat Soft, 2009).

De acuerdo a los criterios del estimador de Kaplan-Meier, se consideraron los datos como completos si se registró en algún bimestre la muerte de algún individuo marcado, mientras que los de los individuos que al final del estudio permanecieron con vida se denominaron como datos censados. Este análisis se realizó con datos tomados de octubre de 2008 a febrero de 2009 (16 meses).

A fin de comparar la supervivencia en las dos parcelas se realizó un análisis de comparación de dos muestras de Log-Rank (Keiding, 2006) y se calculó el estimador

Kaplan-Meier (Borgan, 2006). El mismo procedimiento se realizó para comparar la supervivencia de cada categoría por separado para ambas parcelas.

A fin de comparar la supervivencia por categoría en ambas parcelas se realizó un análisis de comparación de muestras múltiples, y finalmente se calculó el estimador Kaplan-Meier.

Todos los análisis mencionados se realizaron con el paquete STATISTICA 7 (2004).

4.3.3 Supervivencia estacional

Con el fin de saber si existe una relación entre la precipitación y la supervivencia se realizó una correlación de Pearson con las tasas de supervivencia bimestrales y la precipitación.

Para comparar las medias de supervivencia en temporada de secas y de lluvia se realizó, para cada parcela, una prueba de Mann-Whitney con el paquete STATISTICA 7 (2004), empleando las tasas de supervivencia de los meses de secas y las tasas de los meses de lluvia.

4.3.4 Análisis de crecimiento

Con un modelo matricial de Lefkovitch (Caswell, 1989; Silvertown y Charlesworth, 2001) se evaluó la probabilidad de transición de una categoría a otra, considerando el crecimiento, la permanencia, la retrogresión y la reproducción; esta última no se presentó durante el intervalo de tiempo que abarcó el estudio. En cada muestreo se determinó la categoría a la que pertenecía cada planta y la probabilidad de transición correspondiente. Los datos se analizaron estacional y anualmente, así como para el intervalo de 16 meses. Para el primer caso, se realizaron las matrices bimestrales para después resumir el comportamiento estacional en dos matrices promedio, una para la época de secas y otra para la de lluvias. Para la época de secas se promediaron las matrices de octubre de 2008 a junio de 2009 y

para la época de lluvia se promediaron las matrices de agosto a octubre de 2009. El análisis de 16 meses se realizó con datos que incluían cuatro meses en los que se permitió la entrada de ganado, con el fin de observar el comportamiento poblacional bajo estas condiciones.

*4.3.5 Proyección de la población de *Agave cupreata**

Se construyó una matriz de proyección con los valores de transición obtenidos con las matrices promedio de secas y de lluvias de cada parcela. La proyección consiste en obtener el vector poblacional en (t+1) empleando la matriz A. En este trabajo se realizaron 20 iteraciones, en una hoja de cálculo, de la siguiente manera:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{n}_{(t)} = \mathbf{n}_{(t+1)}$$

donde:

\mathbf{A} = matriz de proyección

$\mathbf{n}_{(t)}$: número inicial de individuos

$\mathbf{n}_{(t+1)}$: número de individuos en el tiempo t + 1

(Caswell, 1989)

*4.3.6 Simulaciones de la población de *Agave cupreata**

Se realizó una simulación del comportamiento de la población de agaves considerando que las plantas introducidas pertenecían sólo a una de las categorías consideradas. Posteriormente se hizo una simulación para cada una de las categorías.

Con el fin de simular la estructura de categorías de tamaño de los agaves que resultaría de cada tipo de estrategia de introducción de agaves, se iteró cinco veces la multiplicación del vector $\mathbf{n}_{(t)}$ por la matriz A, para lo cual se modeló el vector $\mathbf{n}_{(t)}$ de la siguiente manera:

Para el caso de introducir solo individuos de la categoría de tamaño 1

$$n_{(t)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Para el caso de introducir solo individuos de la categoría de tamaño 2

$$n_{(t)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Para el caso de introducir solo individuos de la categoría de tamaño 3

$$n_{(t)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Con base en estas hipotéticas estructuras iniciales de la población introducida se construyeron las matrices de proyección correspondientes a partir de los datos de campo en ambas parcelas y para las dos estaciones (secas y lluvias). Finalmente se realizaron las cinco iteraciones con base en las probabilidades obtenidas en el modelo.

4.3.7 Retención de suelo

Para evaluar la erosión y la sedimentación de mantillo, se realizó una cuadrícula de 3 m × 3 m sobre un mapa a escala 1:100 de cada terreno, los cuadros se numeraron y se seleccionaron, mediante una tabla de números aleatorios, 167 cuadros de la parcela demostrativa y 68 cuadros de la parcela nueva, de modo que en conjunto representan el 25% de la parcela demostrativa y 30% de la zona considerada de la parcela nueva. A la mitad de cada cuadro se pusieron filas de 3 clavos de 3.5 pulgadas marcados a la mitad, y separados un metro entre sí (cuadros de 1 m × 1 m). Los clavos se colocaron a modo de que la marca quedara al nivel del suelo. En cada uno de los cuadros con clavos se registró la presencia de agaves y se midió la distancia al agave más cercano. Se tomaron medidas

bimestrales de la acumulación o pérdida de mantillo midiendo la diferencia de nivel del suelo observada en cada clavo con respecto a su marca. Se calculó el promedio bimestral, estacional y anual de acumulación o pérdida de suelo por cuadro, por parcela y por grupos de cuadros con y sin agaves durante el periodo de abril de 2009 a febrero de 2010. En las ocasiones en las que se observó evidencia de que los clavos fueron pisados o sacados por el ganado o por personas, éstos no fueron considerados y se reemplazaron por otro clavo en la misma posición, de igual manera en el caso de que algún clavo no se encontrara, se reemplazó con otro clavo en la misma posición.

Con el fin de calcular la erosión o sedimentación media neta (SMN) se calculó la diferencia entre la sedimentación media y la erosión media, obtenidas a partir del promedio de las mediciones en los clavos que mostraron sedimentación y erosión respectivamente. Para cuantificar la erosión o sedimentación media neta bimestral (SMNB) y anual (SMNA) en ton/ha, se empleó la siguiente fórmula (Pizarro, 1999):

$$X = Y \times Da \times 10$$

donde

X = mantillo erosionado o sedimentado (ton/ha)

Y = promedio de mantillo erosionado o sedimentado (mm)

Da = densidad aparente del mantillo (ton/m^3)

En estos promedios no se consideraron los puntos (clavos) que no presentaron variación alguna, es decir, en los que no se registró un proceso de sedimentación ni de erosión. Mediante el método de remuestreo denominado “bootstrap” se calculó el intervalo de confianza al 95% para cada uno de los índices de erosión con ayuda del paquete Excel Pop Tools 3.2.3 (Hood, 2010).

Para obtener la densidad aparente del suelo de las parcelas las muestras se tomaron de acuerdo al siguiente orden: en la parcela demostrativa, a partir del límite norte, se tomó una muestra en la intersección de cada 30 m paralelos a la pendiente y 30 m perpendiculares a ésta. Adicionalmente, se tomó una muestra de una zona claramente distinta a las demás, a 5 m del límite sur y a 32 m del límite este. En total en la parcela demostrativa se tomaron 13 muestras de suelo con ayuda de un recipiente cilíndrico de 220 ml. En el suroeste de la parcela nueva, se tomaron únicamente 6 muestras en la intersección de cada 10 m paralelos a la pendiente y 30 m perpendiculares a ésta, con el mismo procedimiento que en la parcela demostrativa, pero a partir del límite suroeste. Posteriormente, se pesaron las muestras y se secaron en un horno durante 12 horas a 105°C. Una vez secas las muestras se pesaron de nuevo y se calculó la densidad aparente (D_a) de cada muestra con ayuda de la siguiente fórmula:

$$D_a = \text{peso seco (g)} / \text{volumen (ml)}$$

Posteriormente, se promedió la densidad aparente de todas las muestras de cada parcela. Para cada cuadro de 1 × 1 m se tomó la inclinación de la pendiente y su forma (cóncava, convexa, terraceda e irregular), se determinó la textura de la capa más superficial del suelo empleando la guía para la descripción de suelos de la FAO (2006), la distancia al agave más cercano arriba de cada clavo, tomando la distancia máxima de 1 m y el tamaño del agave más cercano (en caso de haberlo a esta distancia). Con las texturas registradas para cada cuadro de clavos se calculó el porcentaje de limo, arcilla y arena presentes con base en el triángulo de clases texturales (FAO, 2006).

4.3.8 Análisis estadístico

Con el fin de saber si existe una relación entre el porcentaje de arcilla, limo y arena del mantillo, la longitud y orientación de la pendiente, la presencia de un agave y, en caso de haberlo, su tamaño con el cambio anual en el espesor del mantillo, se realizó una correlación entre estas variables y el cambio anual en el espesor del mantillo, considerado como la diferencia entre la medida inicial y la final.

Para determinar si existe una relación entre la precipitación y el cambio bimestral en el espesor del suelo se realizó una correlación de Pearson con las tasas de erosión o sedimentación bimestrales con la precipitación.

Todos los análisis estadísticos fueron realizados con STATISTICA 7 (2004).

5. Resultados

5.1 Estructura de la población de agaves

La estructura de la población de agaves de la parcela demostrativa muestra que la categoría tres fue la más abundante de octubre de 2008 a febrero de 2009, seguida por la categoría dos, y ésta, a su vez, por la categoría uno, con excepción del mes de abril, cuando hubo una mayor frecuencia en la categoría uno que en la dos (Figura 7). En los meses posteriores a junio, debido al crecimiento de las plantas, se presentó una disminución en el número de individuos en las categorías uno y dos, y un aumento en el número de individuos en la categoría tres, el mayor número de individuos de esta última categoría se presentó en octubre de 2009 (Fig. 7a).

En la parcela nueva, durante los ocho bimestres hubo una mayor frecuencia de individuos de la categoría uno, seguida por la categoría tres en los bimestres de diciembre de 2008 a

abril de 2009, y por la categoría dos en el resto de los periodos de muestreo (Fig. 7b). En esta parcela, en el mes de octubre de 2009 se presentó la mayor proporción de individuos de la categoría dos, mientras que el mayor número de individuos de la tres se presentó en el mes de febrero de 2010. En la época de lluvias aumentó el número de individuos en la categoría tres y disminuyó el número de individuos en las categorías uno y dos.

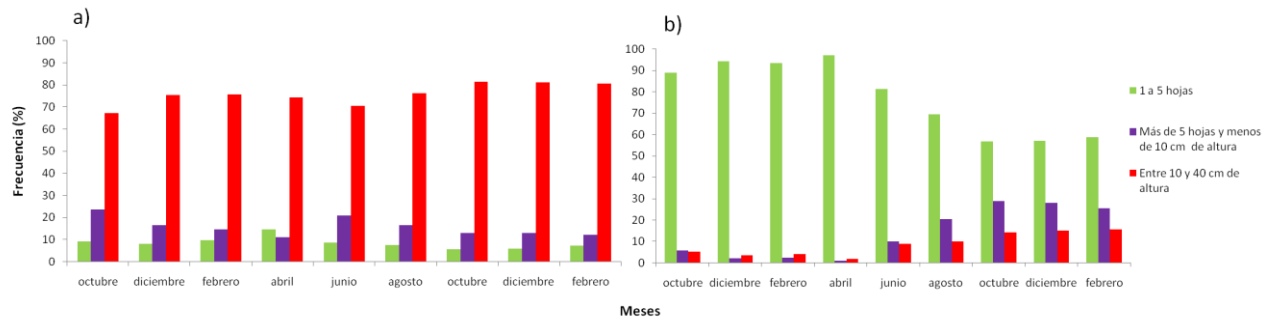


Fig. 7 Frecuencia relativa de las categorías de *Agave cupreata* de octubre de 2008 a febrero de 2010 a) en la parcela demostrativa y b) en la parcela nueva.

5.2 Supervivencia

5.2.1 Tasa de supervivencia

La tasa de supervivencia de los agaves en la parcela demostrativa permaneció constante durante los meses de octubre de 2008 a febrero de 2010, mientras que en la parcela nueva fue decayendo con el paso de los meses hasta el punto de que al final del periodo de estudio sólo se encontraba el 38.9% ($n = 195$) de los agaves iniciales (Fig.8). En la parcela demostrativa la mortalidad fue mayor en los últimos dos bimestres. En la parcela nueva la mortalidad fue mayor en los tres primeros bimestres que en el resto (Fig.9a). La tasa de supervivencia de la categoría uno en la parcela nueva fue disminuyendo a lo largo del año de estudio, mientras que la tasa de supervivencia de las categorías dos y tres disminuyó en mayor medida en los meses de octubre de 2008 a febrero de 2009 y de octubre de 2009 a

febrero de 2010 (Fig.9b). Todos los individuos que al iniciar este estudio estaban en la categoría dos murieron en el transcurso del mismo.

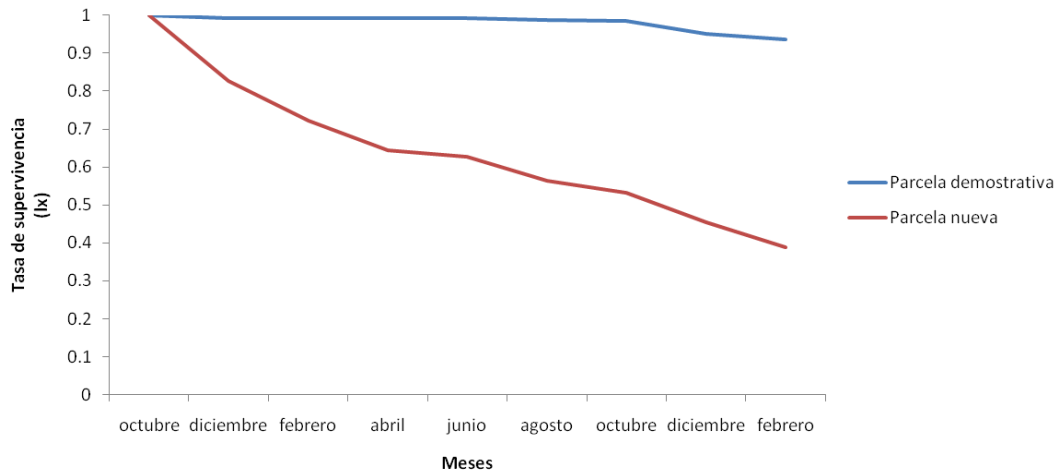


Fig. 8 Supervivencia de *Agave cupreata* en las parcelas demostrativa y nueva.

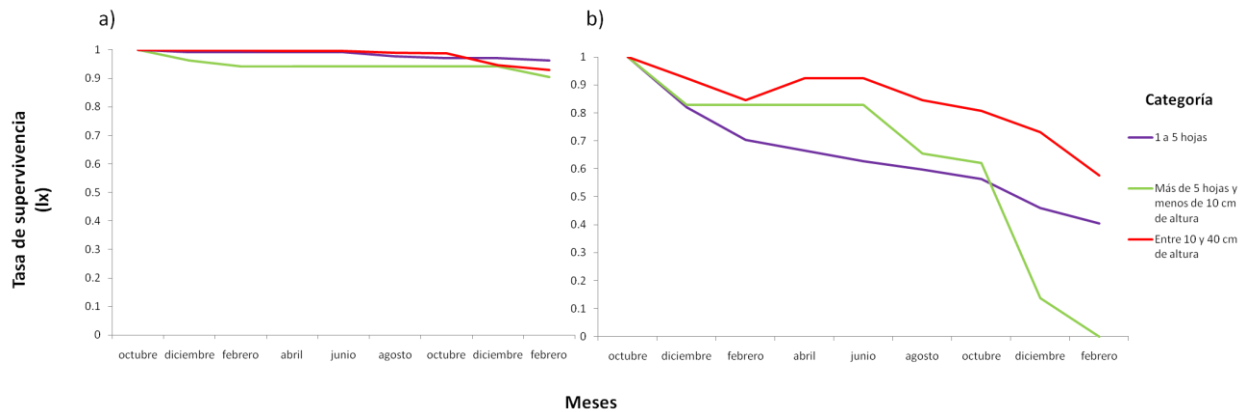


Fig. 9 Supervivencia de las diferentes categorías de tamaño de *Agave cupreata* (a) en la parcela demostrativa, (b) en la parcela nueva.

5.2.2 Supervivencia estacional

No se observaron correlaciones entre la tasa de supervivencia y la precipitación ($r = -0.003$, $p=0.99$) en la parcela demostrativa ni en la nueva ($r = -0.179$, $p = 0.65$).

Tampoco se presentaron diferencias significativas en la tasa de supervivencia de los agaves entre la temporada de secas y de lluvias en la parcela demostrativa ($U = 7.0$; $p = 0.88$) ni en la nueva ($U = 6.0$; $p = 0.655$).

5.2.3 Análisis estadístico

Proporción acumulada de supervivencia por parcela

La supervivencia presentó diferencias significativas entre las dos parcelas ($Z = 21.09$, $p < .00001$). En la parcela demostrativa se presentó una tasa de supervivencia mucho más alta que en la parcela nueva a lo largo del tiempo (Fig.10). La proporción acumulada de supervivencia en la parcela nueva fue disminuyendo a lo largo del estudio, y llegó a ser de 43.3%, mientras que en la parcela demostrativa fue de 98% (Fig. 10).

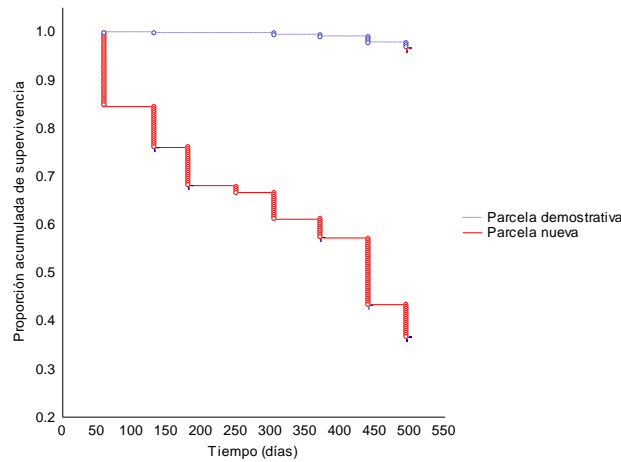


Fig. 10. Estimador del producto límite (Kaplan-Meier) para ambas parcelas.

Proporción acumulada de supervivencia por categorías

El análisis conjunto de las parcelas demostrativa y la nueva, mostó diferencias significativas en la supervivencia acumulada por categorías ($X^2 = 316.54$, g.l.= 2, $p < 0.0001$) (Fig.11).

La proporción acumulada de supervivencia de la categoría uno (1 a 5 hojas) después de un poco más de un año de haber sido trasplantadas es de 36.64%, mientras que la proporción acumulada de supervivencia de la categoría dos (más de 5 hojas y menos de 10 cm de altura) en el mismo periodo es de 82.4%, y la de la categoría 3 (entre 10 y 40 cm de altura) en el mismo periodo es de 95.04% (Fig.11). En los primeros 180 días del estudio se observó la mayor disminución en la proporción acumulada de supervivencia (27.18%) de las categorías uno y dos, mientras que la de la categoría tres permaneció constante (Fig.11).

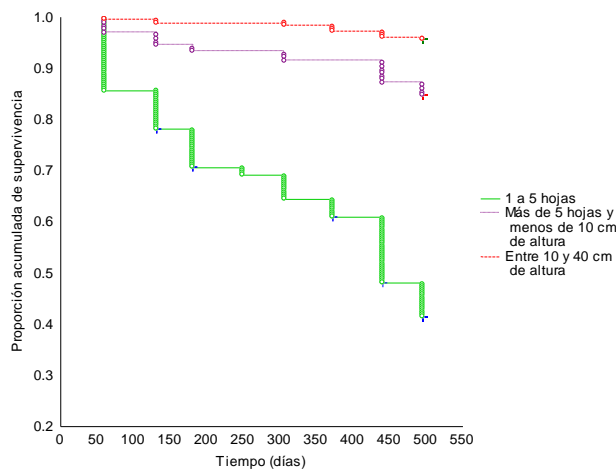


Fig.11 Estimador del producto límite (Kaplan-Meier) para las tres categorías de tamaño, considerando a ambas parcelas conjuntamente.

Proporción acumulada de supervivencia para cada categoría en ambas parcelas

Se presentaron diferencias significativas en la supervivencia acumulada de las tres categorías de ambas parcelas ($Z = 7.98$, $p < 0.0001$; $Z = 8.33$, $p < 0.0001$ y $Z = 8.01$; $p < 0.0001$, respectivamente). La proporción acumulada de supervivencia de la categoría uno en la parcela nueva fue disminuyendo a lo largo del estudio, y llegó a ser de sólo 42.23%, mientras que en la parcela demostrativa alcanzó el 96% al final del estudio (Fig. 12). La proporción acumulada de supervivencia de la categoría dos fue disminuyendo en la parcela

nueva hasta 41.37%, mientras que en la parcela demostrativa llegó a ser de 97.03% (Fig.13). Por último, la proporción acumulada de supervivencia de la categoría tres en la parcela nueva fue disminuyendo en menor medida que el resto de las categorías y representó el 64%, mientras que en la parcela demostrativa llegó a ser del 98.16%. (Fig.14).

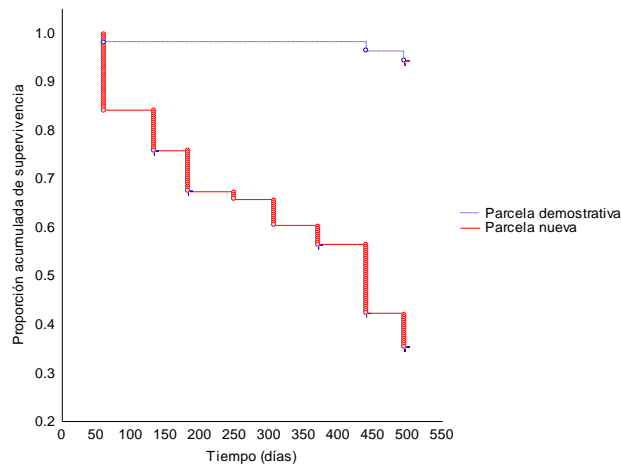


Fig.12 Estimador del producto límite (Kaplan-Meier) para la categoría uno (de 1 a 5 hojas) de los agaves para la parcela nueva y demostrativa.

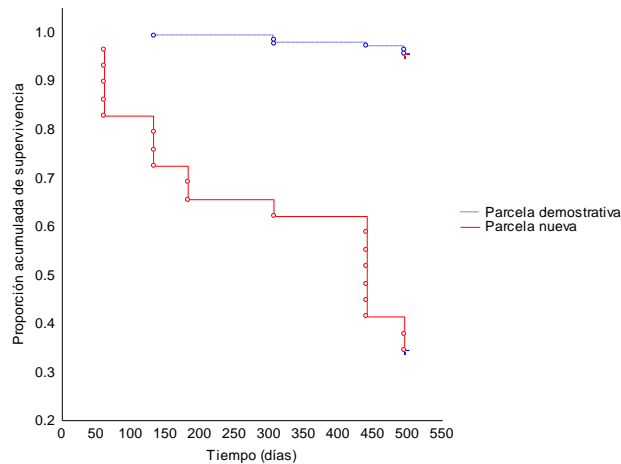


Fig.13 Estimador del producto límite (Kaplan-Meier) para la categoría dos (más de 5 hojas y menos de 10 cm de altura) de los agaves para la parcela demostrativa y nueva.

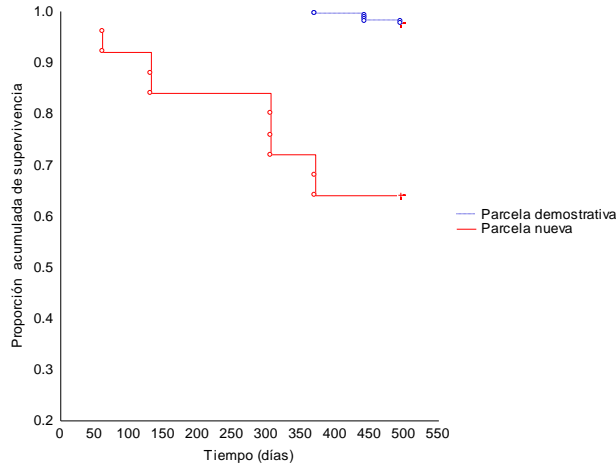


Fig.14 Estimador del producto límite (Kaplan-Meier) para la categoría tres (entre 10 y 40 cm de altura) de los agaves para la parcela demostrativa y nueva.

En resumen, al comparar a las dos parcelas sin categorizar a los agaves, la parcela nueva muestra una supervivencia global del 43.3%, que es significativamente menor a la observada en la demostrativa, que es de 97.7%. Al separar a los agaves de acuerdo a las categorías, pero considerando a las parcelas conjuntamente, la categoría uno tiene una supervivencia significativamente menor que las categorías dos y tres. Además, las tres categorías presentan una proporción de supervivencia acumulada significativamente mayor en la parcela demostrativa que en la parcela nueva.

5.3 Análisis de crecimiento

5.3.1 Análisis anual

La probabilidad de transición de una categoría a otra por crecimiento o retrogresión determina en gran medida la dinámica de una población a lo largo del tiempo, al igual que la probabilidad de que los individuos que están en una categoría permanezcan en ella. En el

caso que nos ocupa, el comportamiento anual de los individuos de las categorías es notablemente diferente entre las dos parcelas (Tabla 2).

Tabla 2. Matriz anual de probabilidad. a) parcela demostrativa, b) parcela nueva. Los valores más altos se indican en negritas

a)				b)			
Categoría de tamaño	1 (N=52)	2 (N=135)	3 (N=382)	Categoría de tamaño	1 (N=446)	2 (N=29)	3 (N=26)
1	0.38	0.06	0.01	1	0.37	0.21	0.15
2	0.37	0.30	0.03	2	0.09	0.21	0.04
3	0.21	0.61	0.95	3	0.02	0.17	0.50

En la parcela demostrativa las probabilidades más altas fueron las de permanencia, seguidas por las de crecimiento y finalmente, por las de retrogresión. La probabilidad más alta (0.95) fue la de la permanencia en la categoría tres, seguida por el paso de la categoría dos a la tres (0.61) y, por último, la permanencia en la categoría uno (0.38). La probabilidad más baja se encontró en la celda correspondiente a la retrogresión de la categoría tres a la uno, que es debida a la muerte de numerosas hojas (Tabla 2). En la parcela nueva, por otro lado, la probabilidad de permanencia en la categoría tres también fue la mayor (0.50), pero fue seguida por la de la permanencia en las otras dos categorías (0.37 para la categoría uno y 0.21 para la categoría dos) y por la de retrogresión de la categoría dos a la uno (0.21). La probabilidad más baja se presentó en la celda correspondiente al paso de la categoría uno a la tres (crecimiento) (Tabla 2). En la parcela nueva, como se ve en la misma tabla, los valores más altos se encuentran en la permanencia, y el crecimiento es menos relevante que en la demostrativa.

5.3.2 Análisis después de 16 meses

De igual manera que en el análisis anual, al considerar el periodo de 16 meses en la parcela demostrativa la probabilidad de transición más alta se presentó en la permanencia en la categoría tres (0.93), seguida por el crecimiento de la categoría dos a la tres (0.53) y por la permanencia en la categoría uno (0.48). En la parcela nueva la probabilidad más alta se presentó en la permanencia en la categoría tres (0.54), seguida por la permanencia en la categoría uno y, finalmente, por la permanencia en la categoría dos, a diferencia del análisis anual donde se presentó el tercer valor más alto en la retrogresión de la categoría dos a la uno (Tabla 3).

Tabla 3. Matriz de probabilidad 16 meses, a) parcela demostrativa, b) parcela nueva.
Los valores más altos se indican en negritas

Categoría de tamaño	1 (N=52)	2 (N=135)	3 (N=382)	Categoría de tamaño	1 (N=446)	2 (N=29)	3 (N=26)
1	0.48	0.08	0.01	1	0.24	0.03	0.00
2	0.13	0.34	0.03	2	0.09	0.21	0.08
3	0.29	0.53	0.93	3	0.02	0.10	0.54

5.3.3 Análisis estacional

El comportamiento estacional fue distinto entre parcelas. En la parcela demostrativa, las probabilidades más altas se presentaron en la permanencia de las tres categorías, especialmente en la uno y la tres, tanto en la temporada de lluvias como en la seca. La probabilidad más baja se presentó, también en ambas temporadas, en la retrogresión de la categoría tres a la uno. En esta parcela, en la temporada de lluvias se presentaron probabilidades más bajas de permanencia y más altas de crecimiento que en la temporada de secas (Tabla 4). En la parcela nueva en la temporada de secas se presentó la probabilidad más alta en la permanencia en la categoría uno (0.83), seguida de la retrogresión de la

categoría dos a la uno (0.54) y de la permanencia en la categoría tres (0.50). La probabilidad más baja se presentó en el paso de la categoría uno a la tres. En la temporada de lluvias los valores más altos se presentaron en la permanencia (Tabla 4), y la probabilidad más baja se presentó, de igual manera que en la temporada de secas, en la celda correspondiente al paso de la categoría uno a la tres.

Tabla 4. Matrices promedio. a) parcela demostrativa en temporada de secas, b) parcela nueva en temporada de secas, c) parcela demostrativa en temporada de lluvias y d) parcela nueva en temporada de lluvias, Los valores más altos se indican en negritas

		Parcela demostrativa			Parcela nueva																																			
Secas	a)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Categoría de tamaño</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.74</td> <td>0.12</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.16</td> <td>0.60</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.08</td> <td>0.28</td> <td>0.93</td> </tr> </tbody> </table>			Categoría de tamaño	1	2	3	1	0.74	0.12	0.01	2	0.16	0.60	0.06	3	0.08	0.28	0.93	b)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Categoría de tamaño</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.83</td> <td>0.54</td> <td>0.43</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.03</td> <td>0.29</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.02</td> <td>0.09</td> <td>0.50</td> </tr> </tbody> </table>			Categoría de tamaño	1	2	3	1	0.83	0.54	0.43	2	0.03	0.29	0.05	3	0.02	0.09	0.50
	Categoría de tamaño	1	2	3																																				
	1	0.74	0.12	0.01																																				
	2	0.16	0.60	0.06																																				
3	0.08	0.28	0.93																																					
Categoría de tamaño	1	2	3																																					
1	0.83	0.54	0.43																																					
2	0.03	0.29	0.05																																					
3	0.02	0.09	0.50																																					
Lluvias	c)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Categoría de tamaño</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.53</td> <td>0.07</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.30</td> <td>0.47</td> <td>0.04</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.17</td> <td>0.44</td> <td>0.94</td> </tr> </tbody> </table>			Categoría de tamaño	1	2	3	1	0.53	0.07	0.01	2	0.30	0.47	0.04	3	0.17	0.44	0.94	d)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Categoría de tamaño</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.74</td> <td>0.22</td> <td>0.13</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.17</td> <td>0.60</td> <td>0.11</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.04</td> <td>0.09</td> <td>0.71</td> </tr> </tbody> </table>			Categoría de tamaño	1	2	3	1	0.74	0.22	0.13	2	0.17	0.60	0.11	3	0.04	0.09	0.71
	Categoría de tamaño	1	2	3																																				
	1	0.53	0.07	0.01																																				
	2	0.30	0.47	0.04																																				
3	0.17	0.44	0.94																																					
Categoría de tamaño	1	2	3																																					
1	0.74	0.22	0.13																																					
2	0.17	0.60	0.11																																					
3	0.04	0.09	0.71																																					

En resumen, en la parcela demostrativa la permanencia fue el proceso dominante en ambas temporadas y se presentó siempre en el mismo orden decreciente (categoría tres, categoría uno y categoría dos). En la parcela nueva, en ambas temporadas, los valores más altos correspondieron a la permanencia en la categoría 1, la probabilidad de retrogresión de la categoría 2 a la 1 fue la segunda probabilidad más alta en la temporada de secas, seguida por la permanencia en la categoría 3. Para la temporada de lluvias la segunda probabilidad más alta fue la de la permanencia en la categoría 3, seguida por la permanencia en la

categoría 2. Esto subraya la importancia que tiene la supervivencia de los individuos de la categoría 3.

*5.3.4 Proyección de la población de *Agave cupreata**

Las proyecciones realizadas con base en las matrices de transición para la parcela nueva indican que la proporción de la población de individuos de la población inicial que permanecen en la misma categoría es mayor en la temporada de lluvias que en la seca para todas las categorías, mientras que ocurre lo contrario en la parcela demostrativa, en la que la disminución en la proporción inicial de individuos de una categoría puede deberse tanto al crecimiento y a la retrogresión como a la mortalidad.

En la parcela nueva la proporción de individuos de la población inicial que permanece en la misma categoría disminuye considerablemente mientras que en la parcela demostrativa la proporción decrece en menor medida (Figura 15). La proporción inicial de individuos que permaneció en la categoría uno en la parcela nueva disminuye en mayor medida que en el resto de las categorías (Fig. 15a); las categorías dos y tres presentan un comportamiento similar entre sí (Fig. 15a y 15b). Por otro lado, en el caso de la parcela demostrativa, la categoría dos es la que disminuye en mayor medida respecto a las otras dos (Fig. 15b), mientras que las categorías uno y tres presentan un comportamiento similar (Fig. 15a y 15c).

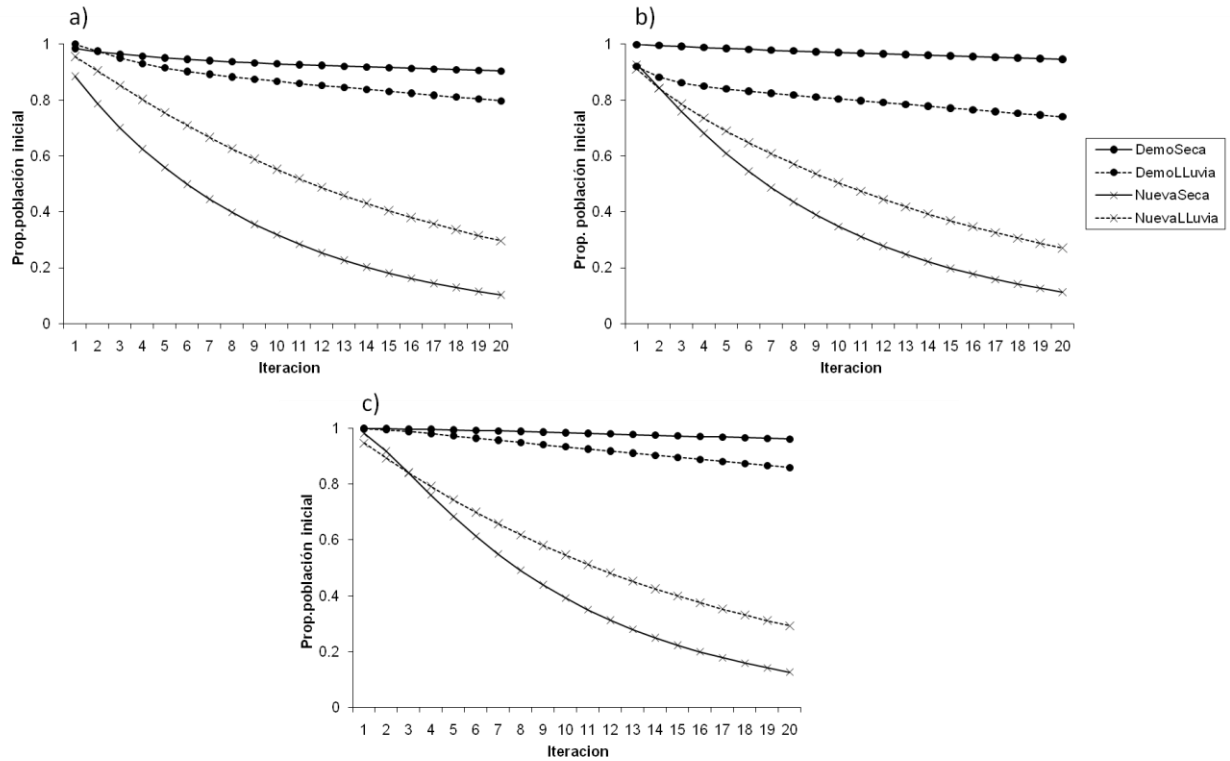


Fig. 15 Proyección del cambio en la proporción inicial de individuos en cada categoría en ambas parcelas. a) al introducir sólo individuos de la categoría uno, b) al introducir sólo individuos de la categoría dos, y c) al introducir solo individuos de la categoría tres.

5.3.5 Simulaciones de la estructura de la población de *Agave cupreata*

De acuerdo a las proyecciones, a pesar de introducir sólo individuos de la categoría dos o solo de la categoría tres, habrá individuos en las categorías anteriores; los individuos presentes en estas categorías son producto de retrogresiones debidas, como ya hemos mencionado, a la pérdida de hojas (Fig. 16). Cuando se simula que sólo se plantan individuos de la categoría tres, al término de la simulación en ambas parcelas se obtiene una mayor proporción de individuos en esta categoría que al hacer las simulaciones con el resto de las categorías.

En las tres estrategias de introducción se presenta una mayor proporción de individuos en la categoría tres si se efectúa la introducción en época de lluvias. En esta gráfica es posible observar que en todos los casos, independientemente de la categoría con la que se realice la introducción, en la parcela demostrativa predomina el crecimiento, mientras que en la nueva predominan la permanencia en la categoría inicial y la retrogresión, más que el crecimiento, i.e., la supervivencia durante el periodo de establecimiento es el proceso dominante.

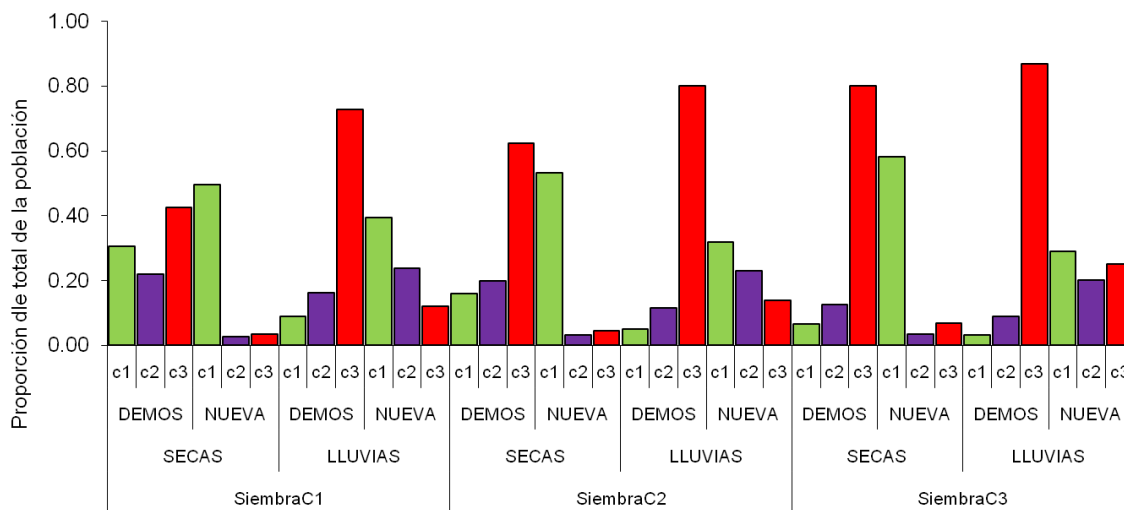


Fig. 16 Simulación de las estructuras de tamaño después de 5 iteraciones, considerando siembras de plantas de sólo una de las tres categorías de tamaño para ambas parcelas.

5.4 Características físicas del suelo

La densidad aparente del suelo en la parcela demostrativa fue de 0.78 g/ml y de 0.79 g/ml en la nueva.

Las texturas predominantes en la parcela demostrativa fueron la arcillosa Y, que se presentó en 38 muestras (23.03%), la franco-arcillosa FY presente en 32 muestras (19.39%) y la areno-francosa AF, presente en 17 muestras (10.30%), mientras que las texturas

predominantes en la parcela nueva son la arcillo arenosa YA presente en 15 muestras (22.73%), la franco arcillosa FY presente en 12 muestras (18.18%) y la franco-arenosa FA presente en 8 muestras (12.12%) (FAO, 2009) (Fig. 17).

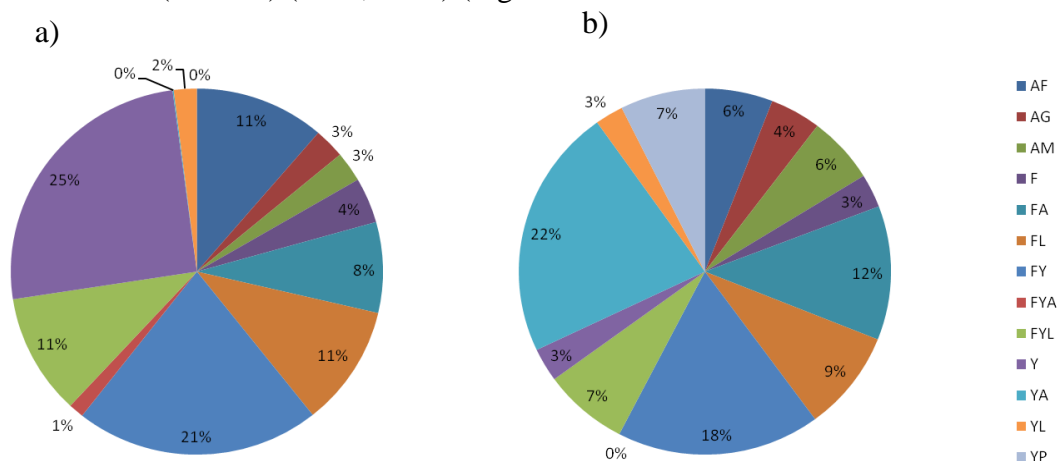


Fig. 17. Porcentaje de las clases de textura presentes en la parcela demostrativa (a) y en la parcela nueva (b). AF: Areno-francoso, AG: Arena gruesa, AM: Arena media, F: Francoso, FA: Franco-arenoso, FL: Franco- limoso, FY: Franco arcilloso, FYA: Franco arcillo-arenoso, FYL: Franco arcillo-limoso, Y: Arcilloso, YA: Arcillo-arenoso, YL: Arcillo-limoso (FAO, 2009).

5.5 Erosión y sedimentación

5.5.1 Erosión y sedimentación media neta bimestral y anual

La erosión y sedimentación del suelo presentaron un comportamiento diferencial a lo largo del estudio. En los registros de abril, junio y octubre, ambas parcelas presentaron una mayor tasa de erosión que de sedimentación, en agosto la parcela demostrativa presentó una mayor tasa de sedimentación mientras que la parcela nueva presentó mayor erosión y en los últimos dos bimestres (diciembre y febrero) se registró una mayor tasa de sedimentación que de erosión en ambas parcelas (Fig. 18). Se observó una menor variabilidad en el cambio bimestral en el espesor del suelo en la parcela demostrativa (Fig. 19a) que en la nueva (Fig. 18b).

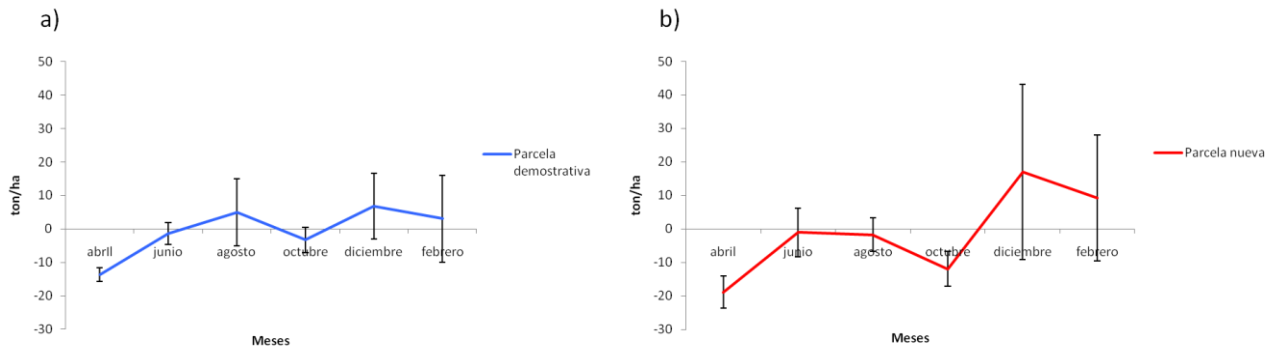


Fig. 18. Erosión y sedimentación media neta bimestral en la parcela demostrativa (a) y en la parcela nueva (b). Las barras muestran el error estándar.

Se obtuvo una sedimentación media neta anual de 5.47 ton/ha para la parcela demostrativa y de 27.59 ton/ha para la nueva, con un intervalo de confianza al 95% a través de un remuestreo (bootstrap), de -6.18 a 18.92 y de 8.09 a 47.74 respectivamente. Esto quiere decir que con un 95% de confianza los índices de erosión y/o sedimentación se encontraran entre estos valores. El intervalo de confianza del índice de sedimentación anual de la parcela nueva es más amplio que el de la parcela demostrativa.

En el periodo de estudio, ambas parcelas tienden a la retención de suelo más que a la erosión del mismo, aunque, como se mencionó anteriormente, hay periodos del año en el que esta última predomina (Fig. 18).

5.5.2 Precipitación, erosión y sedimentación

No se presentaron correlaciones significativas entre el cambio en el espesor del suelo y la precipitación en la parcela demostrativa ($r = 0.35$, g.l. = 316, $P > 0.48$) ni en la nueva ($r = 0.12$, g.l. = 129, $P > 0.82$).

5.5.3 *Correlación entre el cambio anual en el espesor del mantillo y la textura, la pendiente, la distancia al agave más cercano y el tamaño del agave más cercano.*

En el caso de la parcela demostrativa existe una correlación significativa ($r = 0.1288$, g.l.= 316, $P = 0.022$) entre el cambio en el espesor del suelo y el porcentaje de limo. No se presentaron correlaciones entre el porcentaje de arcilla y arena, grado de la pendiente, la distancia al agave más cercano, altura y número de hojas del agave más cercano y el cambio anual en el espesor del mantillo (Tabla 5a). En el caso de la parcela nueva ninguna correlación resultó significativa (Tabla 5b).

Tabla 5. Correlación de las variables con el cambio en el espesor del mantillo en la parcela demostrativa (a) g.l. = 316, * = $P < 0.05$ y en la parcela nueva (b) g.l.=129, * = $P < 0.05$

a)

Variable							
Variable	Porcentaje de limo	Porcentaje de arcilla	Porcentaje de arena	Grado de la pendiente	Distancia al agave más cercano	Altura del agave más cercano	Número de hojas del agave más cercano
Cambio en el espesor del mantillo	$r = 0.13^*$	$r = -0.04$	$r = -0.07$	$r = 0.22$	$r = 0.04$	$r = 0.04$	$r = 0.04$

b)

Variable							
Variable	Porcentaje de limo	Porcentaje de arcilla	Porcentaje de arena	Grado de la pendiente	Distancia al agave más cercano	Altura del agave más cercano	Número de hojas del agave más cercano
Cambio en el espesor del mantillo	$r = 0.07$	$r = 0.03$	$r = -0.08$	$r = -0.04$	$r = 0.06$	$r = 0.04$	$r = 0.04$

6. Discusión y conclusiones

Antes de iniciar la discusión es necesario hacer hincapié que las dos parcelas en las que se trabajó son muy diferentes entre sí y por ello no deben ser consideradas como réplicas una de la otra. Este es un trabajo se analizan los resultados de una actividad desarrollada previamente a su inicio y, consecuentemente, no se cuenta con una parcela testigo tanto porque las parcelas de esta comunidad no son equivalentes entre sí (varían en altura, pendiente, orientación, tipo de uso y grado de erosión) como porque no era posible desmontar una parte de cada uno de los terrenos utilizados para poder hacer comparaciones del comportamiento del mantillo en partes con y sin agaves.

6.1 Supervivencia

6.1.1 Diferencia entre categorías

La introducción de agaves para la retención del suelo es una práctica de larga tradición en México (Rivera, 1990; Zizumbo-Villareal y Colunga-GarcíaMarín, 1993), sin embargo, para que sea exitosa debe estar basada en prácticas adecuadas. En El Peral se optó por introducir agaves provenientes de viveros de la región. Se esperaba contar con plantas que ya habían sobrevivido a las presiones de selección que enfrentan todas las plántulas y de esta manera obtener mayores porcentajes de supervivencia, además de mantener la diversidad del germoplasma regional.

Cuando se opta por plantar agaves en vez de introducirlos desde semillas, el tamaño de las plantas en el momento de la introducción es determinante para el éxito de su establecimiento. Esto fue evidente en las parcelas analizadas en este trabajo, pues los agaves de la primera categoría de tamaño (1 a 5 hojas) mostraron siempre las menores tasas

de supervivencia, lo cual fue especialmente notorio en la parcela nueva, en donde las plantas tenían solo cuatro meses de haber sido introducidas (Fig. 9). En la parcela demostrativa también hubo mayor mortalidad en la primera categoría, pero dado que en este sitio los agaves tienen ya cuatro años, es de suponerse que los que se encuentran en esta categoría actualmente son muchos menos que los que se introdujeron (Fig. 9), *i.e.*, actualmente el periodo de mayor mortalidad que seguramente sucedió a la introducción ya fue superado por las plantas que se encuentran presentes en la parcela. Es probable que al menos alguno de los agaves de categoría uno de la parcela demostrativa resulten de retrogresión más que de falta de crecimiento. Desafortunadamente no se cuenta con registros de la mortalidad en los periodos inmediatos a la introducción de las plantas.

La baja tasa de mortalidad de la categoría tres (entre 10 y 40 cm de altura) denota que una vez alcanzado un tamaño umbral los riesgos de mortalidad disminuyen considerablemente, tal como ocurre en muchas especies y en particular en otras agaváceas como *Furcraea parmenteri*, que presenta altas probabilidades de supervivencia una vez alcanzado un tamaño umbral que, en este caso, es de una roseta de 3 a 11 hojas y menos de 50 cm de altura (Hernández, 2009). Esto es debido a que los agaves de mayor tamaño son menos susceptibles a cambios estacionales, a la herbivoría y a la pérdida de hojas. De esto se desprende que los agaves que se vayan a introducir deben de ser de un tamaño adecuado que variará dependiendo del sitio y de la especie de que se trate, ya que como se demuestra en este estudio, si se trasplantan demasiado pequeños tienen probabilidades muy bajas de sobrevivir. En el caso de la especie que nos ocupa, esto debe ser tomado en cuenta, pues desafortunadamente algunos de los trasplantes se realizan como parte de programas oficiales de reforestación que son evaluados únicamente por el número de plantas

introducidas y no por su supervivencia. De esta manera, las cuotas de reforestación se cumplen, pero sus resultados son deficientes y el esfuerzo y la inversión realizados llegan a ser estériles (C. Illsley, com. pers.).

6.1.2 Efectos estacionales

La estacionalidad no afectó directamente a la supervivencia en ninguna de las parcelas durante el periodo que abarco este estudio, pues la tasa de supervivencia se mantuvo relativamente constante a lo largo de todo el año y no se presentaron diferencias significativas entre las tasas de supervivencia en la temporada de secas y la de lluvias.

En ambas parcelas la estacionalidad se manifiesta en un incremento en la probabilidad de retrogresión entre las categorías durante la época de secas. Nuestros resultados apuntan a que el cambio estacional afecta directamente más al crecimiento que a la mortalidad (Tabla 4). De hecho, incluso en la parcela nueva, donde predominan los agaves más pequeños y de reciente introducción, la mortalidad se da a una tasa prácticamente constante durante todo el año (Fig. 8).

6.1.3 Entrada de animales a las parcelas

El incremento en la mortalidad registrado en los dos últimos bimestres (Figs. 8 y 9) se debe en gran medida a la entrada de animales a las parcelas, cuyo cuidado se relajó. La ausencia de ganado en las parcelas es determinante para el éxito del trasplante de los agaves con fines de restauración, ya que los animales además de ingerir completamente a las plantas pequeñas y defoliar a las de mayor tamaño, desprenden los agaves más chicos y, además, contribuyen a la compactación del suelo.

Los comuneros de El Peral aceptaron la introducción de agaves en parcelas erosionadas porque esperaban poder obtener beneficios económicos del uso de las plantas grandes para la producción de mezcal. Si el pastoreo no permite el desarrollo de los agaves, los beneficios económicos nunca serán reales, y el interés por la protección del suelo de este tipo de parcelas basado en la introducción de especies nativas posiblemente decaerá.

6.2 Crecimiento

El crecimiento de los agaves tiene un comportamiento estacional. Como era de esperarse, en la temporada de lluvias se incrementaron las probabilidades de crecimiento y disminuyeron las probabilidades de retrogresión, mientras que ocurrió lo contrario en la temporada de secas. Esto se debe a que en temporada de lluvias hay una mayor disponibilidad de agua, por lo que las plantas cuentan con los recursos necesarios para su crecimiento.

Las altas probabilidades de permanencia en las diferentes categorías en ambas parcelas se deben en gran medida a que las plantas semélparas perennes tienen estadios juveniles largos, que pueden durar de unos años a algunas décadas (Young y Augspurger, 1991; Stearns, 1992; Silvertown y Charlesworth, 2001). En el caso particular de la especie que nos ocupa, la permanencia también está determinada por las bajas tasas de crecimiento que característicamente muestran los individuos. Para el caso de *A. cupreata* el periodo de crecimiento que antecede a la madurez sexual en la región es de siete años aproximadamente (García-Meneses, 2004; Illsley *et al.*, 2007). Por otro lado, las plantas en el sitio de estudio enfrentan fuertes presiones de selección, como la baja disponibilidad de agua, y la pobreza del suelo, lo que ocasiona que el crecimiento sea lento y la permanencia en la misma categoría sea el proceso más importante, sobre todo en las plantas de mayor

tamaño. La permanencia en la categoría de menor tamaño es riesgosa ya que en ella la tasa de mortalidad es la más alta en las dos parcelas. El efecto de los animales que entran a la parcela es muy dañino para esta categoría, pues la retrogresión que provocan es justamente hacia la categoría de mayor riesgo y el daño al tejido foliar acaba por comprometer la supervivencia de la planta, como se desprende de este estudio.

En un estudio demográfico de *A. cupreata*, Illsley *et al.* (2007) encontraron que la permanencia es el proceso que más afecta a la tasa finita de crecimiento (λ) de una población silvestre, seguido por la retrogresión y, en último lugar, el crecimiento. Nuestras observaciones en los agaves introducidos en las parcelas coinciden con esta tendencia. En ambas parcelas fue poco frecuente que individuos de la categoría tres (entre 10 y 40 cm de altura) perdieran tantas hojas y/o altura como para regresar a la primera categoría (Tablas 2, 3 y 4), la probabilidad general de retroceder a la categoría inmediata anterior fue menor al 4%. Sin embargo, este escenario, que es favorable para los fines con los que fueron plantados los agaves puede alterarse drásticamente si no se retoma el cuidado de las parcelas y se permite que continúe el paso de gente y animales.

6.3 Proyección de la población de *Agave cupreata*

La matriz de proyección construida a partir del modelo en el que se introducen individuos de una sola categoría muestra que la proporción de individuos que permanecen en la categoría inicial en la parcela nueva es mayor para todas las categorías en la temporada de lluvias que en la de secas, debido a que hay una menor mortalidad por desecación. En el caso de la parcela demostrativa esta proporción es menor, pues debido al crecimiento, muchos individuos pasan a la categoría siguiente a la inicial. Con base en estos modelos,

podemos decir que independientemente de la categoría inicial de las plantas que son introducidas, en la parcela demostrativa se presentará más crecimiento de los individuos que en la nueva, en la que predomina la permanencia. Al analizar estos resultados, sin embargo, es necesario recordar que el modelo está construido con base en las probabilidades de transición obtenidas a partir de la estructura de la población en las dos parcelas, y que pasaron cuatro años entre la introducción de los agaves en la demostrativa y la nueva.

Al comparar las proyecciones en ambas parcelas se observó que la proporción de individuos de la población inicial que permanece en la misma categoría es más alta para la parcela demostrativa que para la nueva, debido a que los individuos de la parcela demostrativa se encuentran ya bien establecidos y son mayores. En el caso de los individuos de categoría uno, es de suponer que tienen aparatos radiculares más desarrollados que los de la parcela nueva y que, probablemente, muchos estén en esta categoría por procesos de retrogresión más que por falta de crecimiento. Desafortunadamente se desconoce la mortalidad correspondiente al periodo de establecimiento de los agaves recién trasplantados en esta parcela, aunque posiblemente tuvo un comportamiento similar a la mortalidad en la parcela nueva.

La proporción de la población inicial de individuos que permanece en la categoría uno en la parcela nueva disminuye en mayor medida que en el resto de las categorías; este cambio se debe tanto al crecimiento y el consecuente paso a las categorías subsiguientes como a la mortalidad. En el caso de la parcela demostrativa, la permanencia en la categoría dos es menor respecto al resto, y en este caso el cambio se debe más al crecimiento a la categoría siguiente que a la mortalidad o a la retrogresión.

6.4 Simulaciones de la estructura inicial de la población

A pesar de que en el modelo utilizado sólo se introducen individuos de una de las tres categorías, al proyectar el crecimiento de la población después de introducir únicamente individuos de la categoría dos (más de 5 hojas y menos de 10 cm de altura) de la tres (entre 10 y 40 cm de altura), habrá individuos en categorías anteriores debido a los procesos de retrogresión causados por la pérdida de hojas.

En esta simulación es posible ver que la mejor época para introducir los agaves es la de lluvias, y que, de acuerdo al modelo es posible que haya retrogresiones. Las poblaciones introducidas tienden tener tasas de supervivencia más altas conforme mayores son las plantas introducidas. Sin embargo, hay que recordar que en este modelo se asume que la tasa de supervivencia para los agaves introducidos será la misma que para aquellos que ya se encuentran en las parcelas y que se analizan en este trabajo. Es posible que los individuos recién introducidos, independientemente de su tamaño, tengan tasas de supervivencia diferentes a las observadas entre los que fueron trasplantados con anterioridad. Con base en esta simulación, recomendamos realizar la introducción de los agaves en la época de lluvias, utilizando siempre que las condiciones del suelo lo permitan, individuos de categoría tres, ya que de acuerdo a las proyecciones es en esta temporada y con esta categoría donde hay una mayor supervivencia y un mejor crecimiento, lo que, al paso del tiempo permitirá que haya un mayor cantidad de individuos reproductivos, que el suelo se encuentre más protegido al tener una mayor cobertura vegetal y que los dueños de las parcelas obtengan beneficios económicos. Con esto en mente, es necesario resaltar la importancia de los viveros locales como fuentes de plantas desarrolladas y fuertes que

garanticen que el esfuerzo de introducción se traduzca en tasas altas de sobrevivencia y de crecimiento que permitan el uso óptimo de los agaves.

6.5 Retención del suelo

6.5.1 Diferencia entre estaciones

La retención del suelo y la disminución de la erosión fue el objetivo central del esfuerzo realizado por los cooperativistas al introducir agaves en parcelas erosionadas. Los procesos de erosión y sedimentación son altamente variables espacial y temporalmente. La variabilidad estacional de la erosión está determinada principalmente por la erosividad de la lluvia y por los cambios en la cubierta vegetal (Cerdá, 2001). En la zona de El Peral, las intensas precipitaciones son causa de pérdida del suelo por arrastre del sustrato a lo largo de las laderas, que tienen pendientes marcadas. Este fenómeno se agudiza en la zona debido a la alta tasa de cambio de uso del suelo, la fragmentación del bosque primario y la sobreexplotación agrícola de las parcelas, con la consecuente compactación del suelo. En el periodo de secas, la erosión eólica contribuye a la pérdida de suelo cuando no hay cubierta vegetal que lo proteja. La presencia de ganado contribuye a empeorar las condiciones del suelo.

La mayor sedimentación de suelo observada en ambas parcelas en el mes de diciembre fue posible debido a que la precipitación había cesado, el suelo continuaba húmedo y a que había un estrato herbáceo que contribuyó a la retención de mantillo, sobre todo en la parcela nueva. Es posible que la presencia de una zanja en la parte alta de cada una de las parcelas también contribuyó a este proceso.

En la parcela nueva se presentó una mayor variabilidad en el cambio en el espesor del suelo que en la parcela demostrativa (Fig. 18), esto puede sugerir que la parcela demostrativa

tiene una mayor capacidad de amortiguamiento a la perturbación, mientras que la parcela nueva responde rápidamente a cualquier evento de lluvia o viento. Este amortiguamiento puede deberse a que los agaves en esta parcela, que son de mayor tamaño y tienen varios años de haber sido introducidos, ya amortiguan los cambios en el espesor del suelo, y a que esta parcela tiene mayor tiempo bajo estrategias de recuperación.

6.5.2 *Índice de erosión y sedimentación anual*

El conocimiento de la tasa de erosión en un sitio es imprescindible para tomar decisiones sobre el manejo y las medidas de conservación del suelo. En términos generales, la erosión natural varía en el arrastre de partículas de 0 a un promedio máximo de 1.0 mm por año (Pando *et al.*, 2003). Cuando la cubierta vegetal es modificada significativamente, ya sea por un proceso natural o por alguna actividad humana, las tasas de erosión pueden sobrepasar la tasa promedio en un sitio dado (Schumm y Harvey, 1982). Pimentel y Kounang (1998) mencionan que, a nivel mundial, las tasas de erosión varían de 0.001 a 2 ton/ha/año en terrenos relativamente planos con cubierta vegetal herbácea y/o boscosa, y de 1 a 5 ton/ha/año en regiones montañosas con cubierta vegetal primaria. En general, se considera el valor de 11.2 ton/ha como el límite máximo tolerable de erosión anual (Schmidt *et al.*, 1982), que no supone una degradación progresiva del suelo pues se presenta cuando la tasa de erosión no es mayor que la tasa de formación.

Al calcular el cambio neto anual en El Peral en el periodo de estudio se observó que en ambas parcelas se tiende a que se sedimente una mayor cantidad de suelo que la que se erosiona. Sí se presenta erosión, especialmente en algunos meses, pero el cambio neto resultó a favor de la sedimentación. Consideramos que los valores de erosión superficial obtenidos en este estudio se encuentran dentro del promedio, ya que la erosión media neta

fue cero. Lo anterior puede deberse a cuatro factores: 1) la efectividad de la introducción de los agaves, 2) el efecto estacional de la vegetación herbácea, 3) la presencia de la zanja acarreadora de la lluvia y, finalmente, 4) se presentó una mayor cantidad de cuadros de clavos en la parte baja de las parcelas (103 en la parcela demostrativa y 38 en la parcela nueva) que en la parte superior de éstas (66 en la parcela demostrativa y 30 en la parcela nueva). Cabe mencionar que la parcela demostrativa se encuentra en la parte baja de la ladera, y la nueva en la parte intermedia, pero que, a pesar de ello, es poco probable que la sedimentación haya aumentado solo por la erosión de las partes más altas y el arrastre del suelo hacia abajo, pues el suelo arrastrado no llega a las parcelas de estudio debido a la zanja que las bordea. Lamentablemente es imposible separar con claridad el efecto que tuvo la presencia de los agaves sobre la sedimentación del suelo del resto de los factores, sobre todo considerando que el diseño se hizo para toda la parcela y no para cuadros seleccionados de acuerdo a la presencia o ausencia de agaves.

En estudios posteriores deberá evaluarse el papel que la cubierta herbácea juega en la retención del suelo, sobre todo porque a lo largo del presente estudio se observó que el estrato herbáceo alcanza a cubrir una gran proporción del suelo. De igual manera recomendamos realizar un diseño experimental aleatorizado pero con el mismo número de cuadros con clavos en ambas partes de las parcelas. Finalmente, sería conveniente desarrollar, en estudios posteriores, un diseño que compare dentro de la misma parcela y a una escala menor a la que utilizamos en este estudio, el comportamiento del mantillo en cuadros con y sin presencia de agaves.

La introducción de agaves cumple con varios de los postulados de FAO (2000), pues incrementa la cobertura vegetal de los suelos (especialmente en la parcela demostrativa

donde la vegetación herbácea es más escasa), contribuye a la formación de materia orgánica, probablemente permite retener humedad (aunque sería necesario cuantificarla en estudios posteriores), posiblemente también reduce la escorrentía, sobre todo después de alcanzar cierto tamaño, y protege a la parcela en general.

6.5.3 Relación entre el cambio anual en el espesor del mantillo y textura, pendiente, distancia al agave más cercano y tamaño del agave más cercano.

La correlación significativa entre el porcentaje de limo y el cambio en el nivel del suelo en la parcela demostrativa (Tabla 5) indica que en los cuadros donde la textura del suelo tiene una mayor proporción de limo la tasa de erosión será mayor. Esto es consistente con el hecho de que por lo general el limo presenta una gran susceptibilidad a la erosión tanto hídrica como eólica debido a su baja cohesión y plasticidad (Brady y Well, 2002). La falta de correlación entre estos dos parámetros en la parcela nueva indica que la erosión es la misma con las diferentes cantidades de limo que hay en ella y que en este caso la variación en el suelo no es suficiente para determinar diferentes grados de erosión. No se encontró una relación entre la distancia al agave más cercano, su altura y el número de hojas con el cambio en el espesor del mantillo (Tabla 5). La falta de una parcela testigo, sin agaves introducidos, y la colocación aleatoria de los cuadros de 1 m x 1 m dificultan la interpretación de estos resultados, que deben considerarse como una referencia y no como finales. A pesar de ello, el hecho de que sí haya acumulación de suelo debe tomarse en cuenta como una indicación de la pertinencia de la introducción de estas plantas para retener el suelo.

Para poder evaluar experimentalmente y con mayor precisión el efecto que tiene la presencia de agaves sobre la acumulación o pérdida de mantillo se requeriría de una parcela

experimental, con una parte sin cobertura vegetal, con la superficie expuesta y con características físicas similares a las de la parcela de estudio, o bien introducir agaves únicamente en una parte de la parcela. Por ello, la información obtenida en este estudio es muy importante como fuente de valores de referencia y de líneas base.

6.5.4 Patrón de introducción de los agaves

Los agaves han sido y son utilizados por los agricultores tradicionales en diversos sistemas agrícolas, principalmente en terrenos con pendientes pronunciadas, para controlar el escurrimiento de agua y controlar la pérdida de suelo mediante la formación de bordos y terrazas (Colunga García-Marín *et al.*, 2007; Boege, 2008).

Los agaves introducidos en las dos parcelas estudiadas no fueron plantados haciendo terrazas, si no que fueron distribuidos formando líneas paralelas a la pendiente, distantes entre sí, y no perpendiculares a ella. De esta forma, la distancia más grande entre dos plantas se encuentra en la dirección perpendicular de la pendiente, y no en la paralela, de modo que no se logra el efecto de terraza con el que se espera retener el suelo. Consideramos que esto es erróneo y que se obtendrían mejores resultados empleando la práctica tradicional de formar terrazas o bordos con los agaves, ya que de esta manera el suelo se encuentra más protegido de la escorrentía gracias a una verdadera barrera formada por estas plantas (CONAFOR, 2007).

Conclusiones

1. Los agaves de la categoría uno (1 a 5 hojas) recién introducidos tienen probabilidades muy bajas de sobrevivir.
2. A partir de la categoría tres (entre 10 y 40 cm de altura) la probabilidad de supervivencia se incrementa drásticamente, lo que indica que existe un tamaño umbral a partir del cual los individuos se ven menos afectados por las presiones de selección.
3. Con base en la disminución de la tasa de mortalidad observada en el campo y en las simulaciones realizadas, se recomienda introducir agaves de categoría tres, siempre que el sustrato lo permita, y de preferencia en época de lluvias.
4. La permanencia en las tres categorías tiene valores altos en la matriz de probabilidad, lo que indica que es un proceso importante para la dinámica de esta población. La probabilidad de la permanencia incrementa conforme aumenta el tamaño de las plantas.
5. En temporada de lluvias se incrementan las probabilidades de crecimiento, mientras que en secas se incrementan las de retrogresión. La retrogresión generalmente se debe a la muerte de algunas hojas por causas naturales, sobre todo por desecación, aunque en los 2 últimos bimestres el ramoneo por parte de vacas y chivos jugó un papel importante en este proceso.
6. La tasa de erosión fue menor que la tasa de sedimentación.

7. Existe una mayor variabilidad en el cambio del espesor del suelo en la parcela nueva que en la parcela demostrativa, y el rango de variación es también mayor, lo cual sugiere que los agaves tienen un efecto amortiguador sobre los posibles cambios en el mantillo por el efecto de la lluvia o del viento.

Literatura citada

- Aguilera, N. 1989. *Tratado de edafología de México*. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Barrios, E. 2007. Soil biota ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* **64** (2007): 269-285.
- Boege, E. 2009. *El Patrimonio Biocultural de los Pueblos Indígenas de México*. Instituto Nacional de Antropología e Historia: Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas, 2008.
- Borgan, O. 2006. Kaplan-Meier Estimator. En Kragh, P. y N. Keiding (eds). *Survival and Event History Analysis*. Wiley. Inglaterra. pp: 279-285.
- Brady, N. C., Well, R. R. 2002. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall. 13a edición, Upper Saddle River, NJ.
- Bruman, H. J. 2000. *Alcohol in Ancient Mexico*. The University of Utah Press, Utah.
- Caswell, H. 1989. *Matrix population models*. Sinauer Associates, Inc. Massachusetts, USA.
- Charman, P. y B. Murphy, 2007. *Solis: Their properties and management*. Tercera edición. Oxford University press. Australia.
- Cerdá, A. 2001. La erosión del suelo y sus tasas en España. *Ecosistemas* **10**(3)

- Colunga-GarcíaMarín, P. Y D. Zizumbo-Villareal, 2006. Tequila and other Agave spirits from west-central Mexico: current germoplasm diversity, conservation and origin. *Biodiversity and Conservation* **16**(6): 1653-1667.
- Colunga G.; P.; A. Larqué S., L. Eguiarte y D. Zizumbo. 2007. El futuro de lo ancestral. En: Colunga-GarcíaMarín, P.; L. Eguiarte, A. Larqué S. D. Zizumbo-Villarreal (eds.). *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves* CICY-Conacyt-Conabio-INE, México. Pp: 395-402.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 2007. *Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales: Manual de Obras y Prácticas*. CONAFOR-SEMARNAT. 3ª edición. México. pp: 173-193.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).1998. "Límite Nacional". Escala 1:250 000.Extraído del Modelo Digital del Terreno. INEGI. México.
- Cotler, H. y M. P. Ortega-Larrocea. 2006. Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, México. *Catena*. **65** (2006): 107-117.
- Cotler, H. y S. Martínez-Trinidad. 2010. An assessment of soil erosion costs in Mexico. *Land degradation and desertification: assessment, mitigation and remediation* **5**:639-648.
- Cram, S.; H. Cotler, L. M. Morales, I. Sommer, E. Carmona. 2008. Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM. **66**: 81-104.
- Delgado, D. 2007. La petición de lluvia en la región Centro-Montaña de Guerrero y su importancia en la conservación de recursos naturales. *Rev. Bras. Agroecología*, **(2)**1:131-135.
- Eguiarte, L. y A. Búrquez. 1987. Reproductive ecology of *Manfreda brachystachya*, an iteroparous species fo Agavacea. *The Southwestern Naturalist* **32**(2): 169-178.

- Eguiarte, L. y V. Souza, 2007. Historia natural del agave y sus parientes: Evolución y Ecología En P. Colunga, A. Larqué, L. Eguiarte, D., Zizumbo (eds.) *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves*. CYCY. Yucatán, México. pp.: 3-21.
- Elizalde, L., 1995. *Estudios sobre la germinación y plantación de dos especies útiles en la recuperación de suelo:s Buddleia cordata y Nicotiana glauca*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Eswaran, H. 1994. Soil resilience and sustainable land management in the context of AGENDA21. In *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. D. J. Greenland and I. Szabolcs (eds.). CAB Int., Wallingford, Oxon, UK. pp: 21-23.
- Eswaran, H., R. Lal and P.F. Reich. 2001. Land degradation: an overview. In: Bridges, E.M., I.D. Hannam, L.R. Oldeman, F.W.T. Pening de Vries, S.J. Scherr, and S. Sompatpanit (eds.). *Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification, Khon Kaen, Thailand*. Oxford Press, New Delhi, India. pp: 20-25.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2000. *Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*. 8 Boletín de Aguas y Tierras de la FAO. Roma, Italia.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2006. *Guidelines for soil description*. 4 ed. Rome.
- Foth, H. D. y L. M. Turk, 1978. *Fundamentos de la ciencia del suelo*. Compañía editorial Continental, México.
- García, E. M. y L., Varela. 1987. *Modificaciones al sistema de clasificaciones de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la Republica Mexicana)*, Ed. Larios. México.

- García Meneses, P., 2004. *Reproducción y germinación de Agave cupreata Trel. y Berger (Agavaceae) en la localidad de Ayahualco, Guerrero*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México.
- García-Mendoza, A., 1992. *Con sabor a Maguey*. Guía de la Colección Nacional de Agavaceas y Nolináceas del Jardín Botánico, Instituto de Biología – UNAM.114.
- García-Mendoza A. 2002. Distribution of Agave (Agavaceae) in Mexico. *Cactus and Succulent Journal* 74:177-178.
- Gentry, H. S. 1982. *Agaves of continental North America*. University of Arizona. Tucson.
- Granados, D., 1993. *Los agaves en México*. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Grupo de estudios Ambientales (GEA), 2008; www.gea-ac.org. (Visitada por última ocasión el 25 de Mayo de 2008).
- Google Earth 6.0, 2010.. Disponible en internet. URL <http://www.google.com/earth/index.html> (última consulta: febrero 2010)
- Hernández, R., 2009. *Estudio poblacional de Fucraea parmentieri (Agavaceae) en bosques templados del Suroeste del Distrito Federal, México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México.
- Hood, G. M. 2010. PopTools version 3.2.3. Disponible en internet. URL <http://www.poptools.org>
- Hudson, N., 1982. *Conservación del suelo*. Reverte. España.
- Illsley, C.; E. Vega, I. Pisanty, A. Tlacotempa, P. García, P. Morales, G. Rivera, J. García, V. Jiménez, F. Castro. 2007. Maguey papalote: hacia el manejo campesino sustentable de un recurso colectivo en el trópico seco de Guerrero, México En P. Colunga, A. Larqué, L. Eguiarte, D., Zizumbo (eds.) *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves*. CYCY. Yucatán, México, pp.: 319-338.

INEGI, 1987. Carta de uso de suelo y vegetación E14-9 Chilpancingo. Editor. García-Bazán, J.

INEGI, 1999. Carta geológica E14-8 Chilpancingo. Editor. García Bazán, J.

INEGI, 2005. Archivo histórico de localidades.

<http://mapserver.inegi.org.mx/AHL/realizaBusquedaurl.do?cvegeo=120280060> revisado por última ocasión en mayo de 2009.

Keiding, N, 2006. Logrank Test En Kragh, P. y N. Keiding (eds). *Survival and Event History Analysis*. Wiley. Inglaterra. pp: 309-310.

Landa, R.; J. Meave, J. Carabias. 1997. Environmental deterioration in rural Mexico: An examination of the concept: *Ecological Applications*, 7(1): 316-329.

Lal, R., A. Wagner, D.J. Greenland, T. Quine, D. W. Billing, R. Evans, K. Diller. 1997. Degradation and Resilience of Soils. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, **352** (1356):997-1010.

Martin, M., 2008. *Effect of Management and Habitat on Population Structure and Density of Agave cupreata in Guerrero, Mexico*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Columbia. E. U.A.

Merino, L., 2004. *Conservación o deterioro. El impacto de las políticas públicas en las instituciones comunitarias y en los usos de los bosques en México*. Instituto Nacional de Ecología. México. D.F.

Mielniczuk, J. y Schneider, P. 1984. Aspectos sócioeconômicos do manejo de solos no sul do Brasil. En: *I Simpósio de manejo do solo e plantio direto no sul do Brasil e III Simpósio de conservação de solos do planalto*.

Millennium Ecosystem Assessment, 2003. *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*. Island Press, Washington.

- Morgan, R. P. C., 2005. *Soil erosion and conservation*. Third edition. Blackwell Publishing. UK.
- Nobel, P. S., 1979. Infrequent Establishment of Seedlings of *Agave deserti* (Agavaceae) in Northwestern Sonora Desert. *American Journal of Botany*, **9**(66): 1079-1084
- Nobel, P. S., 1988. *Environmental biology of agaves and cacti*. Cambridge University Press. New York. USA.
- Nobel, P.S. 1998. *Los incomparables agaves y cactus*. Ed. Trillas. México.
- Pando M.; M. Gutiérrez, A. Hernández, J. L. Palacio, E. Estrada. 2003. Comparación de métodos en la estimación de la erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas*. 51:23-36.
- Pimentel D.; Harvey C, Resosudarmo P, Sinclair K, Kurz D, McNair M, Crist S, Sphpritz L, Fitton L, Saffouri R, Blair R. 1995a. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science (Washington DC)* 267:1117–23.
- Pimentel, D. y N. Kounang. 1998. Ecology of Soil Erosion in Ecosystems. *Ecosystems*. (1): 416-426
- Pizarro T., R y H. Cuitiño. 1999. Evaluación Cuantitativa de la Erosión Hídrica Superficial en Suelos Desnudos de la Pre-Cordillera Andina y Valle Central de la VII región. VI Jornadas del CONAPHICHILE. 25-28 DE MAYO, 1999.
- Pritcnnett, W. 1991. *Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento*. Limusa. México, DF.
- PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente; 2000), *Annual Review*, Nairobi, Kenia.
- PNUMA. 2010. GEO América Latina y El Caribe. Programa de Naciones Unidas para el Medio ambiente. Panamá.

- Rivera, J. 1990. *El uso del maguey (Agave sp.) en la conservación del suelo*. Tesis de Licenciatura. UACH. México.
- Schmidt, B.L.; Allmaras, R.R., Mannering, J.V. y Papendick, R.I. 1982. *Determinants of soil loss tolerance*. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America. Madison.
- Schumm, S. A. y M. D. Harvey. 1982. Natural soil erosion in the USA. In: *Determinants of soil loss tolerance*. ASA Special Publication 45 (2):15-22.
- Seoáñez, M, A.; A. Chacón Gutiérrez e I. Angulo, 1999. *Contaminación de suelo: estudios, tratamiento y gestión*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Sociedad de Solidaridad Social “Sansekan Tinemi”, 2008; www.laneta.apc.org. (última consulta: Mayo de 2009).
- Silvertown, J. y D. Charlesworth. 2001. *Introduction to plant population biology*. Blackwell Scientific Publications. Gran Bretaña 14a. edición.
- Stat Soft. <http://www.statsoft.com/TEXTBOOK/stsurvan.htm> (revisado por última vez en noviembre de 2009).
- STATISTICA, 2004. StatSoft, Inc
- Stearns, S.C. 1992. *The Evolution of Life Histories*. Oxford: Oxford University Press.
- Syers, J. K. 1997. Managing soils for long-term productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. **352**(1356): 1011-1021.
- Tamhane, R. V.; D. P., Motaramani, Y. P., Bali, 1986. *Suelos: química y fertilidad en zonas tropicales*. Editorial Diana. México.
- Young, T. y C. Augspurger, 1991. Ecology and evolution of long-lived semelparous plants. *Trends in Ecology and Evolution*. **6**(9): 285-289.

Zizumbo-Villarreal, D. y P. Colunga-GarcíaMarín, 1993. Tecnología agrícola tradicional, conservación de recursos naturales y desarrollo sustentable. *En*: E. Leff y J. Carabias (coordinadores), *Cultura y manejo sustentable de los Recursos Naturales*. Volumen I, pp 165-202. CIIH-UNAM-Miguel Angel Porrúa. México, D.F.