

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

CENTRO DE AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

EROSIÓN DEL SUELO EN UN SISTEMA

SILVOPASTORIL BAJO BOSQUE DE ENCINO (*Quercus spp*)

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN
AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

P R E S E N T A

FRANCISCO ESPINOSA AVIÑA



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2004

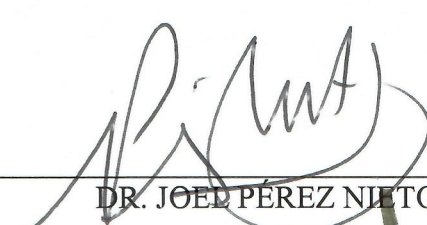
EROSIÓN DEL SUELO EN UN SISTEMA

SILVOPASTORIL BAJO BOSQUE DE ENCINO (*Quercus spp*)

Tesis realizada por **Francisco Espinosa Aviña** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

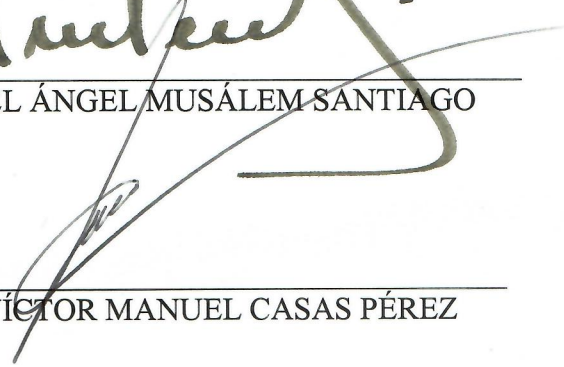
DIRECTOR: _____


DR. JOEL PÉREZ NIETO

ASESOR: _____


DR. MIGUEL ÁNGEL MUSÁLEM SANTIAGO

ASESOR: _____


M. Sc. VÍCTOR MANUEL CASAS PÉREZ

DEDICATORIA

A mis padres, Humberto Espinosa Magaña y Elvira Aviña Zepeda, por todo su amor, apoyo y ejemplo de personas cristianas y trabajadoras.

A mis hermanos Elvira, Emilio y Catalina.

AGRADECIMIENTOS

A la UACH (Universidad Autónoma Chapingo), por abrirme sus puertas y permitirme realizar mis estudios de posgrado. Mi estancia fue agradable.

Al Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible y a los doctores y maestros que integran el Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible de la UACH, así como al CONACYT por el financiamiento otorgado para cubrir mi colegiatura y parte de los gastos de investigación, por su apoyo desinteresado al transmitirme sus conocimientos y experiencias.

Al Dr. Joel Pérez Nieto, por todos los valiosos conocimientos que me transmitió y por su paciente dedicación demostrada como mi asesor y director de tesis.

Al Dr. Miguel Ángel Musálem Santiago, por el minucioso escrutinio de mi trabajo de tesis y por la confianza depositada en mi persona.

Al M. Sc. Víctor Manuel Casas Pérez, por todos sus consejos, amistad y por ayudarme a ser mejor persona. Gracias maestro.

A Dolores Coronel, por su gran bondad e incommensurable gentileza y ayuda.

Al Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agrosilvopastoril, de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM, por todas las facilidades brindadas para realizar el trabajo de campo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Francisco Espinosa Aviña, nació en la Ciudad de México, en el seno de una familia católica, el 5 de febrero de 1972. Sus estudios universitarios los cursó en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Nacional Autónoma de México, obteniendo el título de Médico Veterinario Zootecnista en 1998. De 1994 a 1996, desarrolló actividades preprofesionales en medicina veterinaria en el establo “El Risco”, Tlalnepantla, Méx. De marzo de 1997 a septiembre de 1998, participó como becario PAPIIT-UNAM en un proyecto agroforestal en el Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agrosilvopastoril, perteneciente a la FMVZ-UNAM, centro al que se incorpora como académico a partir de octubre de 1998, y en el que sigue laborando hasta la fecha, teniendo como principales actividades la Coordinación Académica y la impartición de la cátedra de “Manejo de Forrajes” a nivel licenciatura. Entre el 2000 y el 2001, cursó una especialidad en dicha Facultad, obteniendo el grado de Especialista en Producción Bovina. Ha participado como evaluador en el Premio Estatal de Reforestación, Estado de México. Su principal línea de trabajo y de investigación es sobre producción animal y edafología en sistemas silvopastoriles en clima templado.

EROSIÓN DEL SUELO EN UN SISTEMA SILVOPASTORIL BAJO BOSQUE DE ENCINO (*Quercus spp*)

SOIL EROSION IN A SILVOPASTORAL SYSTEM IN AN OAK FOREST (*Quercus spp*)

F. Espinosa Aviña¹; J. Pérez Nieto²

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el efecto que tuvo el pastoreo intensivo de corta duración, con una manada mixta en un bosque de encino, sobre las tasas de escurrimiento de agua de lluvia, de pérdida de suelo y de nutrimentos edáficos. El estudio se desarrolló en un predio ubicado en el municipio de Chapa de Mota, Estado de México, durante el año 2002.

Se delimitaron cuatro parcelas de escurrimiento con la siguiente Densidad Animal Instantánea por tratamiento: T1: 1067.9 UA/ha, T2: 519.07 UA/ha, T3: 347.25 UA/ha y T4: 0 UA/ha (testigo). La lámina de agua escurrida fue para: T1=0.123, T2=0.126, T3=0.233 y T4=0.132 mm ha⁻¹año⁻¹. Pérdidas de suelo: T1=0.76, T2=1.29, T3=0.81 y T4=0.6 kg ha⁻¹año⁻¹; se registraron pérdidas de NO₃⁻ de 1.21, 2.12, 1.51 y 1.78 kg ha⁻¹año⁻¹, para T1, T2, T3 y T4 respectivamente, y pérdidas de K de 1.55, 3.67, 1.49 y 2.81 kg ha⁻¹año⁻¹ para los mismos tratamientos.

Las tasas de escurrimiento, de pérdida de suelo y de nutrimentos registradas en estas parcelas pastoreadas, son menores a las tasas máximas permisibles para este tipo de bosques.

Palabras clave: Bosque, agroforestería, pastoreo, silvopastoril, erosión de suelo.

ABSTRACT

The effect under surface runoff, soil and edaphic nutrients losses rates in a short time intensive grazing with a mixed flock, in an oak forest, was evaluated. This study was carried out in the municipality of Chapa de Mota, Estado de México, during 2002.

Four water runoff plots were established using the following Instant Animal Density for each treatment: T1: 1067.9 AU/ha, T2: 519.07 AU/ha, T3: 347.25 AU/ha and 0 AU/ha. The surface runoff losses were the following: T1=0.123, T2=0.126, T3=0.233 and T4=0.132 mm ha⁻¹year⁻¹. The soil losses were: T1=0.76, T2=1.29, T3=0.81 and T4=0.6 kg ha⁻¹year⁻¹; the NO₃⁻ losses were: 1.21, 2.12, 1.51 and 1.78 kg ha⁻¹year⁻¹ for T1, T2, T3 and T4, respectively; the K losses were: 1.55, 3.67, 1.49 and 2.81 kg ha⁻¹year⁻¹ for the same treatments. The surface runoff, soil and nutrient loss rates obtained in this grazed plots, are lower than the permitted rates for this kind of forest sites.

Key words: Forest, agroforestry, grazing, silvopastoral, soil erosion.

¹Tesista, ² Director

ÍNDICE DE CONTENIDO

Página

	ÍNDICE DE CUADROS	ix
	ÍNDICE DE FIGURAS	x
	ÍNDICE DEL APÉNDICE	xiii
1	INTRODUCCIÓN	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivos particulares.....	16
3	HIPÓTESIS	16
4	REVISIÓN DE LITERATURA	17
4.1	Antecedentes	17
4.2	Posibilidades silvopastoriles	18
4.3	Sistemas de pastoreo	22
4.3.1	Pastoreo continuo	23
4.3.2	Pastoreo rotacional	24
4.3.2.1	Densidad Animal	27
4.4	Precipitación.....	28
4.4.1	Características de las gotas de lluvia.....	29
4.4.2	Características de la lluvia que inciden en los escurrimientos superficiales y en su poder erosivo	30
4.4.2.1	Cantidad.....	30
4.4.2.2	Duración	30
4.4.2.3	Intensidad.....	31
4.4.2.4	Frecuencia.....	31
4.4.2.5	Energía cinética	32
4.5	Origen de los escurrimientos superficiales	32
4.6	Erosión	34
4.7	Erosión hídrica	36
4.8	Infiltración.....	36
4.9	Tipos de erosión hídrica	38
4.10	Cobertura del suelo	39
4.11	Propiedades del suelo relacionadas con la erosionabilidad.....	40
4.11.1	Textura del suelo	41
4.11.2	Estructura del suelo	42
4.11.3	Intercambio catiónico.....	42
4.11.4	Contenido de materia orgánica.....	43
4.11.5	Agentes cementantes	43
4.12	Otros aspectos relacionados con la erosionabilidad de un suelo.....	43
4.12.1	Historia cultural.....	43
4.12.2	Pastoreo y erosión hídrica	44
4.13	Parcelas de escurrimiento.....	46

5	MATERIALES Y MÉTODOS	47
5.1	Descripción del área de estudio.....	47
5.1.1	Localización, extensión y límites.....	47
5.1.2	Clima	48
5.1.3	Hidrología	48
5.1.4	Suelos	48
5.1.5	Vegetación.....	49
5.2	Parcelas para el estudio de la erosión del suelo	51
5.2.1	Delimitación de parcelas	51
5.2.2	Determinación de la superficie y de la pendiente de las parcelas	52
5.3	Forma de pastoreo	52
5.4	Mediciones y determinaciones realizadas	54
5.4.1	Cobertura vegetal del suelo	55
5.4.2	Mantillo	56
5.4.3	Resistencia del suelo a la penetración.....	58
5.4.4	Precipitación.....	61
5.5	Escurrimiento superficial	61
5.6	Determinación del coeficiente de escurrimiento	63
5.7	Infiltración	64
5.8	Pérdida de nutrimentos por escurrimiento	65
5.9	Pérdida de suelo	66
6	RESULTADOS.....	69
6.1	Caracterización de las parcelas experimentales	69
6.1.1	Superficie y pendiente de las parcelas	69
6.1.2	Características físicas del suelo de las parcelas	70
6.1.3	Características químicas del suelo de las parcelas	70
6.2	Cobertura.....	70
6.2.1	Cobertura de mantillo.....	70
6.2.2	Cobertura herbácea.....	72
6.2.3	Cobertura arbustiva	74
6.2.4	Cobertura arbórea.....	76
6.3	Precipitación.....	77
6.4	Escurrimiento superficial	79
6.5	Pérdida de suelo	82
6.6	Tasas de infiltración	89
6.7	Pérdida de nutrimentos (NO_3^- y K) en el escurrimiento superficial.....	94
6.8	Resistencia a la penetración	96
7	CONCLUSIONES	98
8	LITERATURA CITADA.....	100
9	APÉNDICE	113

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Superficie y pendiente de las parcelas experimentales, en Chapa de Mota, Estado de México.....	69
Cuadro 2. Porcentaje de humedad del mantillo antes y después del pastoreo, por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.....	81
Cuadro 3. Coeficientes de determinación (R^2) y ecuación de regresión entre pérdida de suelo y cobertura, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.....	86
Cuadro 4. Infiltración básica (I b), pérdida de suelo (P S) y escurrimiento total en cada uno de los tratamientos, en Chapa de Mota, Estado de México.	93
Cuadro 5. Escurrimiento medio anual, pérdida de NO_3^- y de K por tratamiento, antes y después del pastoreo, en Chapa de Mota, Estado de México.	94

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Chapa de Mota, en el Estado de México.....	47
Figura 2. Vista panorámica del bosque del área de estudio en el CEIEPASP, en Chapa de Mota, Estado de México.	49
Figura 3. Estructura vegetacional del bosque del área de estudio en el CEIEPASP, en Chapa de Mota, Estado de México.	50
Figura 4. Detalle del establecimiento de parcelas de escurrimiento para el estudio de la erosión del suelo, en Chapa de Mota, Estado de México.....	51
Figura 5. Vista de la manada mixta, pastoreando una de las parcelas en estudio. Se observan las líneas de cerco eléctrico y las láminas para separar y conducir escurrimientos superficiales de agua. Chapa de Mota, Estado de México.	54
Figura 6. Cuadro de un metro por lado, para la determinación de la cobertura del suelo por mantillo. Chapa de Mota, Estado de México.	57
Figura 7. Mantillo conformado principalmente por hojas, frutos y ramas de encino. Chapa de Mota, Estado de México.....	58
Figura 8. Determinación de la resistencia del suelo a la penetración. Chapa de Mota, Estado de México.....	59
Figura 9. Captadores de escurrimiento de agua de lluvia y pérdida de suelo colocados en las cuatro parcelas en Chapa de Mota, Estado de México. Año 2002.....	63
Figura 10. Recolección de las muestras de escurrimiento y sedimento. Chapa de Mota, Estado de México.	66
Figura 11. Secado de muestras para determinación de sedimento, con un horno de extracción de aire forzado. Chapa de Mota, Estado de México.....	67
Figura 12. Cobertura del suelo por mantillo, por tratamiento, en Chapa de Mota, Estado de México.	71
Figura 13. Profundidad del mantillo, por tratamiento en Chapa de Mota, Estado de México.....	72
Figura 14. Cobertura herbácea basal (a) y aérea (b) por tratamiento, en un bosque de encino en Chapa de Mota, Estado de México.....	73
Figura 15. Cobertura arbustiva basal, por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.....	74

Figura 16. Cobertura arbustiva aérea, por tratamiento, en un bosque de encino en Chapa de Mota, Estado de México.....	75
Figura 17. Cobertura aérea arbórea, por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.....	76
Figura 18. Precipitación pluvial (mm) por mes, durante el año de 2002, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	78
Figura 19. Precipitación pluvial (mm) registrada un día antes de cada una de las fechas en las que se presentaron escurrimientos superficiales de agua de lluvia, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.....	78
Figura 20. Escurrimiento superficial de agua captado, por fecha, y por tratamiento, durante el año 2002, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	79
Figura 21. Escurrimiento anual acumulado, por tratamiento, durante el 2002, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	80
Figura 22. Pérdida de suelo captada por fecha, por tratamiento, durante el año 2002, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.....	82
Figura 23. Relación entre la pérdida de suelo y el escurrimiento, en un sistema silvopastoril bajo bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México. Año 2002.....	83
Figura 24. Pérdida de suelo acumulada por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	84
Figura 25. Relación entre la pérdida de suelo y la pendiente, en un sistema silvopastoril bajo bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México. Año 2002.....	85
Figura 26. Efecto de la cobertura por mantillo (a) y por arbustivas (b), sobre la pérdida de suelo en un sistema silvopastoril bajo bosque de encino, en Chapa de Mota, estado de México.....	88
Figura 27. Velocidad de infiltración, una semana antes (a), una semana después (b) y tres meses después del pastoreo (c), por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	90
Figura 28. Velocidad de infiltración en el suelo del tratamiento uno (T1), en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.....	91
Figura 29. Velocidad de infiltración en el suelo del tratamiento dos (T2), en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.....	92
Figura 30. Velocidad de infiltración en el suelo del tratamiento tres (T3), en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.....	92
Figura 31. Velocidad de infiltración en el suelo del tratamiento cuatro (T4), en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	93

Figura 32. Relación entre el escurrimiento de agua anual y la pérdida de NO ₃ - (a) y la pérdida de K (b), antes del pastoreo, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	95
Figura 33. Relación entre el escurrimiento de agua anual y la pérdida de NO ₃ - (a) y la pérdida de K (b), después del pastoreo, en un bosque de encino, en Chapade Mota, Estado de México.	95
Figura 34. Resistencia del suelo a la penetración, una semana antes del pastoreo, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	96
Figura 35. Resistencia del suelo a la penetración, una semana después del pastoreo, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	96
Figura 36. Resistencia del suelo a la penetración, tres meses después del pastoreo, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	97

ÍNDICE DEL APÉNDICE

	Página
Cuadro A1. Peso y equivalente en Unidades Animal de los animales de la manada usada para el pastoreo de cada una de las parcelas.....	114
Cuadro A2. Características físicas y químicas del suelo en el área de estudio (profundidad: 0 a 20 cm), en Chapa de Mota, Estado de México.....	115
Cuadro A3. Cobertura del suelo por mantillo en cuatro tratamientos bajo bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	116
Cuadro A4. Cobertura herbácea basal y aérea (%) por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	116
Cuadro A5. Cobertura arbustiva basal y aérea (%), por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	117
Cuadro A6. Cobertura arbórea aérea (%), por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	117
Cuadro A7. Precipitación pluvial (mm) registrada en el año 2002, en Chapa de Mota, Estado de México.....	118
Cuadro A8. Escurrimiento captado por tratamiento con pastoreo en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	119
Cuadro A9. Sedimento captado por tratamiento de pastoreo, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.	123
Cuadro A10. Resultados del análisis de varianza de la resistencia a la penetración del suelo, por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.....	127

1 INTRODUCCIÓN

México, al igual que la mayoría de los países en desarrollo, no ha escapado al problema del crecimiento acelerado de su población. El constante aumento en las demandas de nuevas tierras para la agricultura es uno de los principales resultados de esta sobrepoblación. Dado que los terrenos planos son escasos, las zonas montañosas no aptas para la agricultura, pasan a ser fuente primordial de nuevas tierras para uso agropecuario. En relación a la producción pecuaria, la ganadería en México ha tenido aumentos sin precedentes en los últimos decenios y dado el carácter fundamentalmente extensivo de la ganadería, este incremento ha producido una disminución drástica en la cobertura forestal del país (Challenger, 1998; Maass y García-Oliva, 1990).

Dado que la superficie forestal de México comprende 72% del territorio nacional, y que 34.2 millones de hectáreas, es decir, el 17.5 % corresponde a bosques y selvas (SARH, 1994; INEGI, 1991), el análisis de la productividad de sistemas silvopastoriles, y del efecto que el pastoreo pueda tener sobre las características físicas y químicas de los suelos y sobre las tasas de infiltración y de erosión de los mismos, se presenta como un tema de gran importancia, para poder tener datos útiles para trabajar con sistemas de modelación y para validar técnicas de pastoreo en bosque.

En el Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agrosilvopastoril (CEIEPASP) de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Nacional Autónoma de México, en Chapa de Mota, Estado de México, se ha venido practicando un pastoreo intensivo bajo bosque de encino, con una manada

mixta compuesta por bovinos, ovinos, caprinos, porcinos y equinos, con la intención de obtener un mejor aprovechamiento del recurso forrajero del bosque.

En este trabajo se midió el efecto que sobre la tasa de erosión de suelo y de infiltración de agua de lluvia, en un suelo bajo bosque de encino, tiene el pastoreo intensivo con una manada mixta como la utilizada en el CEIEPASP.

El tipo de pastoreo y la composición de la manada con que se trabajó en esta investigación, está en función de que ésta es la forma en que se ha venido trabajando el pastoreo en el bosque en Chapa de Mota, Estado de México y en algunas otras zonas del país. Se considera que con esta diversidad de especies se pastorea más uniformemente el bosque, es decir, que al tener diferentes alturas de animales y diferentes hábitos alimenticios, requerimientos nutricionales, diferentes tipos de pezuñas, de estructuras bucales y digestivas, así como diferente composición de orina y excremento, el bosque se ve de este modo más favorecido que si se pastorea de forma extensiva y con una sola especie animal.

2 OBJETIVOS

Evaluar el escurrimiento superficial del agua de lluvia y la pérdida de suelo y de nutrimentos en un bosque de encino bajo un sistema de pastoreo intensivo con una manada mixta compuesta por bovinos, ovinos, caprinos, porcinos y equinos.

2.1 Objetivos particulares

- a) Determinar las tasas anuales de escurrimiento de agua de lluvia y pérdida de suelo y nutrimentos en un sistema de pastoreo intensivo con cuatro diferentes cargas animal (alta, intermedia, baja y nula), en un bosque de encino.
- b) Relacionar el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo y de nutrimentos con las características físicas del terreno, la precipitación, la cobertura aérea y superficial, la infiltración del agua en el suelo y la resistencia del suelo al penetrómetro, para explicar su comportamiento antes y después del pastoreo del bosque.

3 HIPÓTESIS

El bosque de encino puede utilizarse para el apacentamiento de manadas mixtas con altas cargas animales y periodos cortos de ocupación sin provocar aumentos en las tasas de erosión del suelo y pérdida de nutrimentos más allá de las ecológicamente permitidas, para la recuperación de la comunidad vegetal y del mantillo orgánico.

4 REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Antecedentes

El pastoreo en bosques naturales es uno de los sistemas silvopastoriles más antiguos y se han practicado desde hace mucho tiempo en Europa, y, en América, desde la colonización. Ejemplo de ello son, en España, las “dehesas” se han desarrollado como una silvicultura pastoral especializada con un manejo de los encinos (*Quercus* spp.) mediante podas que favorecen la producción de bellotas y de forraje tanto de los árboles como del pasto (Etienne, 1996); también, el pastoreo en tierras con bosques de propiedad federal en los Estados Unidos de Norteamérica ha contribuido en forma notable a la producción bovina y ovina de este país (Kosco y Bartolome, 1981; Sánchez, 1998)

En México, los bosques de pino sostienen algunas explotaciones de ovinos y vacunos que, sin embargo, son consideradas de poca importancia (Jiménez y Martínez, 1985).

Muchos poseedores de bosques y pastizales están acostumbrados a usar sus bosques y praderas para un solo propósito, pero los modelos silvopastoriles buscan la integración de árboles con la producción animal. Los sistemas silvopastoriles, están diseñados para generar entradas de dinero por la venta de madera, que a su vez, apoyan las operaciones con ganado en el bosque y así se crea una forma de producción sustentable con muchos beneficios para el medioambiente (Isaacson, 1998; Reynolds, 1995; Shelton, 1993; Cook *et al.*, 1984).

4.2 Posibilidades silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles ofrecen una alternativa sostenible para rehabilitar, conservar y hacer uso de la biodiversidad animal y vegetal, y para aumentar los niveles de producción animal con reducida dependencia de los insumos externos. Con ello, se trata de aprovechar las ventajas de varios estratos de la vegetación, y de mejorar la dieta animal proporcionando una diversidad de alimentos, forrajes, flores y frutos, que permiten al animal variar su dieta y aumentar su nivel de producción (Nitis *et al.*, 1991; Sánchez, 1998).

Los bosques de México, presentan, de acuerdo con lo anterior, un recurso que se debe aprovechar con estrategias tales como los aprovechamientos silvopastoriles. Cabe mencionar que la superficie forestal de México comprende 72% del territorio nacional; es decir, 141.7 millones de hectáreas, cuya superficie arbolada constituida por bosques y selvas ocupa 34.2 millones de hectáreas, equivalente al 17.5% del territorio nacional. Otras áreas forestales que incluyen matorrales, áreas perturbadas y vegetación hidrófila ocupan el 54.8% de la superficie nacional, es decir, 107.3 millones de hectáreas (INEGI, 1991; SARH, 1994).

Sin embargo, uno de los problemas de deterioro ambiental que afecta a México, es la acelerada deforestación, la cual ha tomado tintes dramáticos, ya que el 90% de las selvas húmedas y el 40% de los bosques templados han desaparecido o han sufrido algún daño en su equilibrio ecológico. Entre las causas que han producido lo anterior se pueden indicar: tala inmoderada, apertura de tierras con vocación forestal para la

producción agrícola, asentamientos humanos, erosión acelerada de áreas de cultivo y de pastoreo. (UNAM, 1996; Enkerlin *et al.*, 1997; Challenger, 1998).

Los encinares son frecuentemente considerados como surtidores de leña, madera y forraje para el mantenimiento de animales en pastoreo, y las investigaciones de Jaindl y Sharrow, 1988, revelan que en este tipo de bosques, existe una gran flexibilidad silvopastoril como para mantener producciones sustentables de leña, madera y ganado.

El pastoreo en terrenos forestales y dentro de plantaciones forestales ha sido considerado como una situación conflictiva, pero que viene a auxiliar económicamente a la producción de madera, aunque generalmente no se ha considerado como un componente riguroso para su inclusión y manejo dentro del sistema (Gold y Hanover, 1987).

Los bosques de encino, cubren gran parte del territorio occidental de los Estados Unidos de Norteamérica, gran parte de México y de otras regiones Mediterráneas a través del mundo. Ya que estas tierras son típicamente escarpadas y empinadas, la producción agrícola intensa es frecuentemente impráctica y la conversión de esos suelos a pasturas o a plantaciones forestales puede ser muy costosa. Así, es que queda limitado el uso de los encinares para el desarrollo agrícola o de plantaciones comerciales maderables (Jaindl y Sharrow, 1988).

La urbanización sigue en aumento y la necesidad de optimizar la productividad de la tierra, se vuelve cada vez más urgente, por lo que se deben buscar alternativas ecológicas y económicas para el aprovechamiento sustentable de las tierras boscosas como las de encinares. Por esta razón, es que el desarrollo de sistemas agroforestales en

bosques de encino ha recibido una creciente atención en los últimos años (Gold y Hanover, 1987; Jaindl y Sharrow, 1988).

Hay algunas investigaciones como la realizada por Bernal (1999), en donde se muestra que las presiones de pastoreo en bosque de encino no causan efectos de consideración sobre la composición florística y frecuencia de especies del sotobosque, aunque la mayoría de los estudios no consideran periodos de evaluación a mediano y largo plazo (3-10 años).

Con respecto a coníferas, se han encontrado algunos datos interesantes fruto de investigaciones silvopastoriles con borregos, como el hecho de que el pastoreo durante los primeros años de vida de las plantaciones ha tenido efectos benéficos. El incremento en diámetro y en altura de coníferas jóvenes ha sido mayor en las plantaciones con pastoreo que en las que no se tiene pastoreo, y que la sobrevivencia de los arbolitos no se ve afectada por el pastoreo (Jaindl y Sharrow, 1988), sin embargo, han sido investigaciones realizadas sobre terrenos con pendientes menores al 10%.

También existe información en la que se considera a algunas especies animales, totalmente dañinas para el bosque. Tal es el caso de Castillo (1986), quien reporta que dentro de los animales que tienen el hábito de ramonear incluyendo vacas, borregos y cabras, son estas últimas ramoneadoras no obligadas y son más selectivas entre arbustos que entre especies de hierbas, y menciona que el 90% de su dieta, en algunos lugares, está compuesta por el ramoneo de arbustos. Así mismo, se menciona que la cabra puede causar la destrucción total de la cobertura vegetal y Verduzco (1971) señala que, dentro de los animales que pastan el bosque, los más perjudiciales son la cabra y los porcinos, y

que estos últimos tienen un doble efecto, y en algunos casos son muy perjudiciales, ya que al remover el suelo, sacan la regeneración y provocan principios de erosión.

Es importante hacer notar, que dentro del proceso del pastoreo libre, los animales herbívoros frecuentemente ramonean con poca severidad el follaje agregado a su dieta, y que este ramoneo ayuda al mantenimiento y balance en la vegetación, con lo que se conserva la cobertura vegetal de tal manera que se reducen los efectos erosivos de la lluvia. La diversidad en hábitos de pastoreo ayuda al balance suelo – planta – animal, y la interacción de estos elementos, forma un ecosistema (Skerman, 1988).

La mayor productividad del ganado se logra mediante una estrategia de manejo de los pastos que mantenga el nivel máximo de biomasa y evite el sobrepastoreo. Además de proporcionar forraje, una buena cobertura vegetativa herbácea previene la erosión y la rápida escorrentía del agua y a la vez contribuye al soporte de otras especies presentes en el ecosistema (Pimentel, 1992). Es necesario evitar el sobrepastoreo, que reduce la biomasa y la diversidad de los organismos asociados a la vegetación.

La mayoría de los productores agropecuarios en regiones fronterizas agrícolas de América Latina, hacen uso extensivo de la tierra. En promedio, mantienen sólo alrededor de una cabeza de ganado por hectárea, sin periodos de descanso del terreno. Los que practican sistemas tradicionales de ganadería, frecuentemente experimentan un marcado descenso en la productividad de los pastos después de cinco, diez o quince años. Esto, a menudo los lleva a abandonar grandes áreas de pastos que se convierten en tierras degradadas sujetas a altas tasas de erosión, volviéndose activos fijos con altísimos costos por pérdida de suelo, productividad y biodiversidad, que si bien han sido

tradicionalmente consideradas despreocupadamente como externalidades, si se refirieran a un valor financiero, harían incosteable a la inmensa mayoría de estas formas de uso de la tierra (Fleischner, 1994; Brown and McDonald, 1995; Challenger, 1998).

4.3 Sistemas de pastoreo

Sistema de pastoreo es el proceso por medio del cual los animales cosechan directamente el forraje en las praderas y de acuerdo a los fines particulares del productor, puede ser continuo o rotacional (Hodgson, 1990).

Hodgson (1990) cita que lo fundamental en todos los procesos de producción convencionales es el aprovechamiento de la energía solar y el suministro de los nutrientes del suelo a la planta para la producción de tejidos vegetales. Menciona que el 75 % de los nutrientes que requiere el ganado, provienen del pastoreo.

Holecheck *et al.* (1989) mencionan que los sistemas de pastoreo se deben adaptar a las condiciones locales de las áreas de pastoreo, para un mejor rendimiento de la pradera y de los animales. Moreno y Pérez (1996) al respecto señalan que existen dos variables importantes en el pastoreo, que son la carga animal, que influirá en la presión de pastoreo de la pradera y de los componentes de la misma y el método de pastoreo.

El objetivo de un sistema de pastoreo es mejorar o mantener la producción de una pastura y hacer una utilización adecuada del forraje para obtener una producción animal máxima y/o sostenida a lo largo de todo el año (Hodgson, 1990). Existen varios sistemas de pastoreo conocidos y utilizados, en gran parte del mundo. Holecheck *et al.*

(1989) y Moreno y Pérez (1996), hacen una clasificación de los más comunes: pastoreo continuo y pastoreo rotacional con todas sus variantes.

4.3.1 Pastoreo continuo

El pastoreo continuo es el método más simple de manejo de animales y pasturas y en muchas partes del mundo es el único sistema utilizado. Este sistema permite a los animales andar libremente por los potreros, dando pie a selectividad por parte del animal, con lo cual los animales consumen las hojas y tallos más digestibles para obtener una dieta de más alto valor (Moreno y Pérez, 1996).

Por otro lado, Gifford y Hawkins (1978) menciona que el pastoreo continuo no es un buen sistema para mejorar la condición del pastizal, partiendo de un estado pobre a regular. El crecimiento de nuevas plantas deseables es difícil que ocurra cuando existe un pastoreo continuo todo el año ya que las plantas deseables y menos deseables no pueden reproducirse y diseminarse cuando están siendo continuamente pastoreadas, ya que agotan sus reservas y no tienen tiempo para recuperarse.

Holecheck *et al.* (1989) mencionan que el problema real con el pastoreo continuo, es que el ganado tiene preferencias para ciertas áreas (esas áreas generalmente están donde hay agua, forraje y sombreaderos), que frecuentemente son las zonas más productivas de la pradera, recibiendo un uso excesivo, con el consecuente deterioro de la cubierta vegetal y favoreciendo los procesos erosivos.

4.3.2 Pastoreo rotacional

El pastoreo rotacional es una expresión aplicada a una amplia variedad de prácticas. Sin embargo, comúnmente se usa para designar a una forma de pastoreo que implica mover el ganado de un área a otra con intervalos de tiempo predestinados (Delorit y Ahlgren, 1983).

Tergas (1979) considera que el pastoreo rotacional debe ser empleado como una técnica para controlar la composición botánica del potrero, en lugar de una forma para aumentar el valor nutritivo y productivo el mismo.

Moreno y Pérez (1996) mencionan que el pastoreo rotacional puede favorecer a algunas especies, pero en muchas áreas, las condiciones prevalecientes, limitan fuertemente la posibilidad de éste tipo de pastoreo y es probable que la mayoría de los pastos mejorados se manejen mejor bajo pastoreo rotacional. Mencionan además las ventajas de este pastoreo:

- Proporciona al ganado alimento más apetecible y de mayor valor alimenticio.
- Aumenta la producción de la pradera y disminuye los costos de producción ganadera, aunque al principio estos sean altos.
- Existen menos pérdidas por pisoteo y menor selectividad.
- Hay un pastoreo más uniforme.

El “pastoreo holístico planificado”, es una variante del pastoreo rotacional, ya que es un pastoreo intensivo de corta duración, con muy alta densidad animal, corta frecuencia y cortos periodos de ocupación, y se planea tomando en cuenta “el todo”, es decir, tomando en cuenta todos los elementos e interacciones presentes en la empresa o en el sistema productivo.

Savory (1990) al respecto menciona que el pastoreo biológico planificado, fue desarrollado hace unos treinta años, y que cuando se inició, se le llamó “pastoreo de corta duración” y diez años después se le denominó “método de pastoreo Savory”.

Valentine (1990) señala que este tipo de sistemas es altamente intensivo y que emplea ciertos períodos de recuperación para optimizar el rebrote. El pastoreo de los animales es concentrado bajo una alta densidad animal y la calendarización del pastoreo debe ser planeada, ejecutada o ajustada como se requiera.

Savory (1990), tomando y respetando la idea para dicho pastoreo, menciona que el acto de pisoteo con animales en altas densidades (en gran número, en un espacio reducido, por muy corto tiempo) permitirá hacer un uso mucho más completo de la vegetación disponible sin perjudicar a las plantas, consumiendo diferentes plantas y diferentes partes.

Pinzón y Amézquita (1991) midieron los cambios de las propiedades del suelo, como resultado de su compactación por el pisoteo de animales en pasturas del piedemonte de Caquetá (Colombia). Los resultados de esta investigación revelaron que los animales en pastoreo modifican sustancialmente las propiedades físicas de los suelos del piedemonte amazónico. Sin embargo, la intensidad de estos cambios depende de la

zona y la especie cultivada, siendo más drástico en suelos con guaduilla (*Homolepis aturensis*) que en pasturas de *Brachiaria decumbens* y más en áreas de lomerío y de terrazas que en las vegas. La compactación fue mayor en los primeros 15 cm, ocasionando una severa disminución en la porosidad y cambios desfavorables en la relación suelo-agua-aire que afectan el desarrollo de las raíces de las plantas y su productividad. Con relación a la estructura, se encontró una pérdida de esta característica por pisoteo.

Sánchez *et al.* (1989) evaluaron diferentes niveles de pisoteo (0, 3.3, 6.6 y 8.3 animales/ha/año) sobre las características del suelo, utilizando rotaciones de tres potreros, para un tiempo total de 42 días (14 días / potrero), con bovinos de dos años de edad, cuyo peso inicial era de 180 kg (cabe mencionar que 14 días de permanencia en un mismo potrero se considera pastoreo continuo). Los resultados mostraron que la densidad aparente, como indicador de la compactación mostró valores más bajos a medida que se disminuía el número de animales. El pisoteo redujo la porosidad total, teniendo mayores efectos sobre la macroporosidad. Así, la compactación del suelo se vio aumentada, reduciéndose la capacidad de infiltración del agua de lluvia y aumentando la escorrentía superficial y el arrastre de sedimento.

El movimiento del suelo por efecto de la escorrentía superficial es un proceso que se da prácticamente en todas las regiones del mundo. En los ecosistemas sin perturbar, los procesos podogenéticos (formadores de suelo) compensan las pérdidas edáficas, producto de la erosión hídrica, de tal forma que la cantidad de suelo disponible se mantiene relativamente constante en el tiempo. Los procesos de erosión hídrica se aceleran cuando el ecosistema es perturbado por causas naturales: ciclones, incendios,

etc., o por actividades humanas: transformaciones con fines agropecuarios y silvícolas, construcción de infraestructura entre otras. Frecuentemente, la erosión acelerada no puede ser compensada por los lentos procesos de formación del suelo, lo que causa un empobrecimiento paulatino del ecosistema (Contesse, 1990; Etchevers *et al.*, 2000). El grado de deterioro del suelo depende entonces de la vulnerabilidad del sistema y de la magnitud de la perturbación. A su vez, la vulnerabilidad del sistema depende de las características del sitio, como el clima (principalmente la intensidad de las lluvias), el tipo de vegetación, el tipo de suelo y la topografía (Lowdermilk, 1953; Pieri, 1989; Etchevers *et al.*, 2000). La magnitud de la perturbación se relaciona con el fenómeno perturbador, ya sea natural o provocado por el hombre (tipo de perturbación, frecuencia, intensidad, duración y área afectada). Así, mientras más vulnerable sea el sistema y mayor la magnitud de su perturbación, más severa será la degradación del suelo por efecto de la erosión hídrica y más problemática su conservación (Saplaco y Payawan, 1987; Maas y García-Oliva, 1990; Astier-Calderón *et al.*, 2002).

4.3.2.1 Densidad Animal

La Densidad Animal se define como el número de animales o Unidades Animal (UA)¹ pastoreando en una unidad de pastoreo en un espacio de tiempo determinado. Para calcular la Densidad Animal (DA), se divide el número de Unidades Animal que corresponden al número de animales que se tienen en determinado momento, entre la superficie del terreno que está siendo pastoreado.

¹ Una Unidad Animal es el equivalente a una vaca de 450 kilogramos amamantando a su becerro o con un aumento diario de peso no mayor a 180 g, y sin gasto energético excesivo.

A una gran Densidad Animal, el impacto animal sobre una superficie dada en un día, es bastante alto, y puede convertirse en un impacto bastante dañino cuando los animales permanecen “demasiado” tiempo en un potrero o regresan a él muy pronto para pastorearlo de nuevo. En el primer caso, los animales pueden sobrepastorear cada una de las plantas presentes.

Las ventajas de un pastoreo con Alta Densidad son:

- Los animales tienden a pastorear una gran cantidad de la vegetación disponible de una forma muy pareja y con poca selectividad, dejando pocas plantas sin pastorear o severamente pastoreadas.
- La distribución de la orina y del estiércol sobre el terreno, se vuelve más uniforme.
- Los animales son cambiados de área de pastoreo frecuentemente, ofreciéndoseles pastos más frescos y succulentos, lo que mejora su nutrición.
- Se favorece el aumento en la densidad de plantas, lo que se traduce en mayor cantidad de hoja y menor porcentaje de fibra.
- El desarrollo de los animales se mejora.

4.4 Precipitación

La precipitación pluvial puede ocurrir en varias formas, las cuales pueden cambiar durante el descenso. Las principales formas de la precipitación o de las gotas de agua que la forman son clasificadas como llovizna y lluvia. La llovizna consiste en una

precipitación bastante uniforme con gotas de menos de 0.5 mm de diámetro. La lluvia propiamente dicha, consiste generalmente en grandes partículas (Schwab *et al.*, 1993).

Otra forma de precipitación es el rocío, que es el vapor de agua que se condensa sobre la superficie a causa de una baja temperatura ambiental, sin llegar a ser inferior a 0° C (Becerra, 1999).

La precipitación puede ocurrir también como partículas de agua congelada, incluyendo nieve, aguanieve y granizo. La nieve está compuesta por agrupamientos de cristales de hielo conocidos como hojuelas de nieve. El aguanieve se forma cuando las gotas de lluvia caen atravesando aire que se encuentra bajo una temperatura de congelamiento. Un granizo es una acumulación de muchas capas delgadas de hielo sobre un copo de nieve. De las formas de precipitación, la lluvia y la nieve son las que contribuyen principalmente al aporte de agua sobre la tierra (Schwab *et al.*, 1993).

4.4.1 Características de las gotas de lluvia

Dado que la mayoría de la precipitación ocurre en forma de lluvia y que ésta tiene efectos directos sobre la erosión del suelo, es que las características de las gotas de lluvia son importantes (Hudson, 1977).

Las gotas de lluvia incluyen partículas de agua tan grandes como 7 mm de diámetro. Durante una tormenta, la distribución y el tamaño de las gotas de lluvia pueden variar considerablemente dependiendo de la intensidad de la misma. Una tormenta de gran intensidad no sólo presenta gotas de lluvia de gran diámetro, sino que

también presenta un mayor rango de diámetros de las gotas de lluvia comparada con eventos de lluvia de baja o mediana intensidad (Schwab *et al.*, 1993; Becerra, 1999).

Las gotas de lluvia no son necesariamente esféricas o aerodinámicas. Las gotas de lluvia, al caer, son deformadas de su forma esférica inicial por diferencias de presiones como resultado de la resistencia al aire en su superficie. Las gotas grandes de lluvia se dividen en el aire y las gotas mayores de 5 mm de diámetro, son generalmente inestables (Schwab *et al.*, 1993).

4.4.2 Características de la lluvia que inciden en los escurrimientos superficiales y en su poder erosivo

4.4.2.1 Cantidad

La cantidad de lluvia precipitada en una cuenca influye de manera directamente proporcional sobre los escurrimientos generados en la misma, en función de las características particulares de la lluvia y las que imperan en la cuenca al momento de la precipitación. De esta manera, a condiciones constantes de cuenca, una mayor precipitación, causará escurrimientos de mayor magnitud. Convencionalmente, la cantidad de lluvia se mide por la altura que causa la lámina de lluvia en un pluviómetro, expresada en milímetros y esta cantidad puede expresarse por evento o por periodo (Hudson, 1977; Becerra, 1999).

4.4.2.2 Duración

La duración de un evento de lluvia, puede ser muy variable, generalmente, desde pocos minutos, hasta varias horas. Sin embargo, la duración de la tormenta, por sí sola,

no tiene relación con la escorrentía, a menos que esté asociada con una intensidad alta. Esto último, sin embargo, es raro, pues lo común es que las lluvias de duración prolongada, sean de poca intensidad, y viceversa. Es así que, en las regiones tropicales, los eventos de lluvia son más erosivos que las lluvias de zonas templadas, debido principalmente a la mayor frecuencia de lluvias de alta intensidad, la velocidad del viento y la distribución del tamaño de gotas de lluvia (Hudson, 1977; Lal *et al.*, 1980; El-Swaify y Dangler, 1982; Becerra, 1999).

4.4.2.3 Intensidad

La intensidad de la lluvia se define como “la altura de la lámina de lluvia por unidad de tiempo”, y convencionalmente se expresa en mm/h. La intensidad de las tormentas influye directamente sobre la fracción del volumen medio de precipitación que forma escorrentía, así como también sobre el escurrimiento máximo instantáneo producido por la tormenta. Muchos estudios han mostrado la relación estrecha entre la intensidad de la lluvia y la erosión del suelo (Wischmeier y Smith, 1958; Hudson, 1977; Lal *et al.*, 1980; El-Swaify y Dangler, 1982; Becerra, 1999).

4.4.2.4 Frecuencia

La frecuencia de la lluvia también tiene influencia sobre las pérdidas causadas por la erosión fruto de escurrimientos superficiales. Cuando la lluvia cae a intervalos cortos, la humedad del suelo permanece alta y la escorrentía es más voluminosa, aún si la lluvia es menos intensa. Después de largos períodos, el suelo está más seco y no debería haber escorrentía en lluvias de poca intensidad, pero en casos de sequía, la vegetación puede

sufrir debido a la falta de humedad y así reducir la protección vegetal natural del suelo, quedando éste más expuesto a la acción erosiva de la lluvia (Giasson, 2001).

4.4.2.5 Energía cinética

La energía cinética de una tormenta está relacionada con la velocidad de las gotas de lluvia y el tiempo de impacto con el suelo (Hudson, 1977), y a su vez, esto está relacionado con la distancia total que la gota recorre desde su punto de salida, hasta el punto de impacto y con el tamaño de la misma (Hudson, 1977; Lal, 1979). La velocidad del viento y la energía cinética de la lluvia, determinan la capacidad erosiva de una tormenta. La dirección de la pendiente en relación con la dirección de la tormenta, puede alterar significativamente la energía cinética del impacto de la gota en el suelo, debido al ángulo en el cual ésta golpea al suelo. El impacto máximo se da con un ángulo de 90° (Lal, 1979).

4.5 Origen de los escurrimientos superficiales

El escurrimiento superficial es la fracción de la lluvia que llega a la superficie terrestre y fluye en terrenos con pendiente, hacia los ríos, lagos u océanos. Aunque el granizo, la nieve y el rocío pueden ser importantes desde algunos puntos de vista, en la mayor parte del territorio mexicano tienen poca influencia sobre los escurrimientos superficiales, y como la llovizna generalmente es de una intensidad menor que la velocidad de infiltración de los suelos, la mayoría del agua que cae bajo esta forma, se infiltra y/o evapora. Por lo tanto, generalmente se considera sólo a la lluvia como responsable de generar los escurrimientos superficiales (Morgan, 1997; Becerra, 1999). La proporción del agua de lluvia que escurre superficialmente, varía en un rango amplio,

dependiendo de diversas características de la lluvia y del terreno, pero en términos generales se pueden establecer dos situaciones básicas:

- a) Cuando la intensidad de la precipitación es menor que la velocidad de infiltración del suelo, el escurrimiento superficial será prácticamente nulo, hasta el punto en que la capacidad del suelo sea saturada y la precipitación subsecuente forme un escurrimiento.
- b) Cuando la intensidad de la precipitación es mayor que la velocidad de infiltración del suelo, éste infiltrará sólo parte del agua precipitada, y el excedente quedará sobre el terreno como encharcamiento o fluirá como escorrentía.

La pendiente de la cuenca tiene gran influencia en los escurrimientos superficiales, y por lo tanto se requiere determinarla en cualquier estudio hidrográfico; así mismo, los factores físicos de la superficie del terreno, tienen influencia sobre estos escurrimientos y sobre la capacidad de infiltración de los suelos, y dentro de estos factores sobresalen la cobertura vegetal (a) y las características del suelo (b) (McCalla II *et al.*, 1984; Morgan, 1986; Takar *et al.*, 1991; Dvorak y Novak, 1994):

a) Cobertura vegetal

La cobertura vegetal es un factor importante en el control de la escorrentía, a cuya magnitud afecta en una relación inversamente proporcional. La vegetación amortigua el impacto de la lluvia sobre el suelo, y esto, además de reducir el efecto erosivo por impacto de la lluvia, favorece la infiltración del agua y reduce la magnitud de la

escorrentía. Por otro lado, los residuos vegetales sobre el terreno y los tallos y follaje herbáceo constituyen un obstáculo físico que reduce la velocidad del escurrimiento y su capacidad erosiva (Savory, 1990; Dvorak y Novak, 1994).

El grado de cobertura sobre el terreno puede ser muy variable, dependiendo del tipo de vegetación, su densidad, vigor, etapa fenológica, etc. Por lo tanto, para fines de simplificación, en relación con su efecto amortiguador sobre la escorrentía o efecto hidrológico, comúnmente se le agrupa en categorías para cada uso de la tierra, es decir, la cobertura será buena, regular o mala, las cuales corresponden respectivamente a un potencial de escurrimiento bajo, moderado y alto (Glenn *et al.*, 1993).

b) Características del suelo

El suelo es un sistema heterogéneo, polifásico y dinámico, componente básico de los ecosistemas, y cuyas características pueden ser determinadas en la magnitud y/o modalidad de los escurrimientos superficiales. Algunas de las características del suelo que más se relacionan con la escorrentía son: la estructura, la textura, la porosidad y el contenido de materia orgánica, las cuales a su vez se expresan a través de fenómenos como la velocidad de infiltración, la permeabilidad y el drenaje interno del suelo, entre otros (Takar *et al.* 1991; Morgan, 1997; Becerra, 1999).

4.6 Erosión

La erosión ha sido definida como el proceso o grupo de procesos por los que los materiales sólidos de la tierra, sueltos o consolidados, son disueltos, aflojados o desgastados y removidos de un lugar, para depositarlos en otro (Miller, 1994; Morgan,

1997) por acción del agua o del viento, de ahí las denominaciones de erosión hídrica y erosión eólica. Este proceso se desencadena básicamente cuando el hombre provoca, con sus actividades, el deterioro de la cobertura vegetal.

Muchos de los factores que aceleran la erosión son provocadas por una actitud antropocéntrica (Enkerlin *et al.*, 1997; Serna y Echavarría, 2002). La erosión inducida por el hombre incluye la descomposición de los agregados del suelo y la eliminación acelerada de partículas minerales y orgánicas, como consecuencia de una labranza inadecuada y de la eliminación de la vegetación natural (Elliot *et al.*, 1991; Glenn *et al.*, 1993).

Los factores que determinan el escurrimiento superficial y la erosión, son consecuencia de interacciones complejas entre la vegetación y las características propias del suelo (Wischmeier y Mannering, 1969; Thurow *et al.*, 1986; Takar *et al.*, 1991). Se ha observado en una gran variedad de sitios con comunidades vegetales diversas, que la intensidad del pastoreo puede alterar la superficie del suelo y las características de la vegetación que lo cubre (Wood y Blackburn, 1981; Blackburn *et al.*, 1982; McCalla *et al.*, 1984; Warren *et al.*, 1986).

Para cuantificar la magnitud de la erosión se han desarrollado diversos métodos, algunos basados en la determinación directa del suelo perdido por erosión, mientras que otros constituyen estimaciones numéricas del proceso (Morgan, 1986; Becerra, 1999; Etchevers *et al.*, 2000).

4.7 Erosión hídrica

Los movimientos de tierra por la acción del agua, ocurren en tres fases: partículas individuales de suelo son separadas de la masa de suelo, esas partículas son transportadas por la superficie del terreno y finalmente son depositadas en nuevos sitios (Hudson, 1977; Elliot *et al.*, 1991; Troeh *et al.*, 1999). Esta separación de partículas y su transportación ocurre principalmente y de forma más importante en las tierras altas, con arrastres que terminan con el depósito de los sedimentos en lagos y corrientes fluviales de las tierras bajas (Figueroa, 1975; Elliot *et al.*, 1991).

Una cobertura vegetal abundante, reduce la erosión. Es así que las labores de cultivo, el sobrepastoreo, el pastoreo continuo, la tala de bosques, la minería, las actividades de construcción y el fuego, los cuales destruyen o reducen la vegetación, son actividades o factores que promueven la erosión (Troeh *et al.*, 1999). Los problemas de erosión de suelos en terrenos cubiertos por bosques, son generalmente menos severos que los problemas de erosión en las tierras de cultivo (Klock, 1982).

La copa protectora de la masa boscosa, tiene un efecto positivo en la reducción de la erosión hídrica, ya que provee al suelo de una cobertura o mantillo de hojarasca y ramas (Hudson, 1977).

4.8 Infiltración

La infiltración se refiere a la entrada del agua en el suelo. El volumen de agua que se infiltra por unidad de tiempo en condiciones de campo, es máxima al comenzar la

aplicación de agua y disminuye conforme aumenta la que ya ha entrado en él (Ojeda, 1984; Bernal, 1989).

La velocidad de infiltración es la relación entre la lámina que se infiltra y el tiempo que tarda en hacerlo, expresada generalmente en cm h^{-1} o cm min^{-1} ; depende de muchos factores, entre ellos: la lámina de riego o de lluvia; la temperatura del agua; la del suelo; la estructura, compactación, textura y contenido de humedad del suelo; estratificación y actividades microbianas (Ojeda, 1984; Bernal, 1989).

Existen muchos métodos para medir la velocidad de entrada de agua a un suelo, en condiciones controladas y reproducibles. Dentro de estos métodos, que esencialmente consisten en relacionar el volumen de agua que penetra en una superficie conocida de suelo, por unidad de tiempo, se pueden considerar los tres tipos de movimiento de agua en el suelo: uni, di o tridimensional. La aplicación de agua al suelo en estudios de infiltración puede ser mediante un simulador de lluvia, con lluvia natural o por inundación de una superficie de terreno (Valdés, 2003).

Musgrave (citado por Narro, 1994), propuso el método del doble cilindro para medir la velocidad de entrada vertical de agua a un suelo. Este método consiste en colocar dos cilindros concéntricos y medir en el cilindro central la velocidad con que el agua penetra al suelo. La función del cilindro exterior consiste en evitar o disminuir el movimiento lateral del agua del cilindro central en el suelo. La información que se obtiene es la lámina de agua del cilindro central que se infiltra, a intervalos de tiempo seleccionados y medidos, hasta alcanzar un valor constante en la velocidad de infiltración (Narro, 1994).

4.9 Tipos de erosión hídrica

La erosión hídrica se clasifica en erosión laminar, en canalillos y en cárcavas. Esta clasificación está basada en la naturaleza y la cantidad del suelo removido (Troeh *et al.*, 1999).

La erosión laminar se presenta cuando hay remoción de pequeñas partículas de suelo en una amplia superficie del suelo. La gota de lluvia golpea la superficie del suelo, se forma una capa delgada de agua que al fluir, ocasiona la erosión laminar. El primer signo de este tipo de erosión es cuando el color del subsuelo comienza a aparecer. Esto es más aparente en las superficies altas de elevaciones con pendiente convexa (Troeh *et al.*, 1999).

La erosión en canalillos se presenta cuando los escurrimientos superficiales, tienden a concentrarse formando pequeñas corrientes cuesta abajo. El flujo de esta agua, tiene un gran poder de desgaste sobre la superficie por la que corre, creando pequeños canales al remover partículas de suelo a lo largo de su recorrido (Troeh *et al.*, 1999).

La formación de cárcavas es consecuencia de la profundización de los canalillos. Se forman profundos (1-5 m) y relativamente anchos canales en forma de “U”, favorecidos por una friabilidad uniforme en el perfil del suelo, y cuando ésta se va reduciendo conforme la profundidad aumenta, se forman cárcavas en forma de “V”, dada la menor erodabilidad de las capas inferiores del perfil (Evans, 1994; Troeh *et al.*, 1999).

4.10 Cobertura del suelo

La cobertura vegetal es un factor importante en el control de la escorrentía, a cuya magnitud afecta en una relación inversamente proporcional. La vegetación amortigua el impacto de la lluvia sobre el suelo, y ésto, además de reducir el efecto erosivo por impacto de la lluvia, favorece la infiltración del agua y reduce la magnitud de la escorrentía. Por otro lado, los residuos vegetales sobre el terreno y los tallos y follaje herbáceo constituyen un obstáculo físico que reduce la velocidad del escurrimiento y su capacidad erosiva.

De manera general, la condición hidrológica del área de drenaje en cuanto a la cobertura vegetal ha sido clasificada en tres categorías: condición hidrológica buena, si la cobertura vegetal es mayor al 75 %, condición hidrológica regular, si la cobertura vegetal es del 50 al 75 % y condición hidrológica mala, si la cobertura vegetal es menor al 50 % (Becerra, 1999).

En investigaciones realizadas acerca de la influencia de la cubierta vegetal sobre la erosión, se ha encontrado que la densidad de la misma tiene un efecto significativo sobre las pérdidas de suelo. Lang y McCaffrey (1984), en una investigación realizada en tierras de pastoreo cubiertas por pasto, encontraron que después de 10 años de observaciones, con una cobertura del 100%, las pérdidas de suelo fueron de 10 kg ha⁻¹ año⁻¹ y, en contraparte, con una cobertura del 20% la erosión fue de 4 000 kg ha⁻¹ año⁻¹.

Cuando un suelo desnudo se encostra por una capa dura, que frecuentemente es cubierta por algas y líquenes, se reduce o inhibe el proceso de sucesión vegetal, y se

bloquea el ciclaje de minerales en el suelo, y aunque esa costra puede llegar a reducir la erosión en el sitio, incrementa el escurrimiento superficial y provoca erosión en otros sitios aguas abajo. Los suelos arenosos pueden llegar a encostrarse, pero el problema mayor se presenta en los suelos pesados (arcillosos) que han perdido su estructura de migajón y han reducido su contenido de humus y mantillo, ya que esos suelos se sellan y se vuelven impermeables con el sólo impacto de la gota de lluvia, lo que provoca escurrimientos superficiales. En sitios con condiciones medioambientales frágiles, como el altiplano mexicano, el efecto de manada, entendido como el impacto que sobre el suelo y la vegetación del mismo produce un gran número de animales en estado de excitación, es una de las maneras más prácticas de romper y abrir un suelo encostrado, al mismo tiempo que se incorpora materia orgánica a ese suelo. Un suelo cubierto por mantillo y vegetación, no se encostra (Bingham and Savory, 1990).

Elwell y Stocking (1976) señalan que para lograr una eficiente y adecuada protección contra la erosión, al menos el 70 % de la superficie debe estar cubierta, lo cual coincide con lo reportado por Lang y McCaffrey (1984); Pérez-Nieto *et al.* (2001) y Hernández (2001), quienes mencionan que la cobertura del suelo por mantillo, es la que protege mejor o reduce la erosión, en mayor medida que las coberturas vegetales.

4.11 Propiedades del suelo relacionadas con la erosionabilidad

Cualquier propiedad que dificulte la disgregación de las partículas de suelo y su posterior transportación, es una propiedad que reduce la erosionabilidad del suelo. La textura y la estructura tienen relación directa con el tamaño de partícula expuesta a los elementos erosivos. Las propiedades del suelo que afectan la tasa de infiltración y la

permeabilidad, tienen también relación con el grado de erosión de un suelo. La infiltración y la permeabilidad son influenciadas en gran medida por la textura y por la estructura de un suelo (Troeh *et al.*, 1999).

Las principales propiedades de un suelo forestal que se relacionan con la erosión son: la textura, porosidad, contenido de materia orgánica, densidad, retención de humedad, pH y agregación (Wooldridge, 1964; Schmidt, 1982; Lal, 1999; Troeh *et al.*, 1999).

Wischmeier *et al.* (1971) mostraron que la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, la estructura del suelo y su permeabilidad, son las propiedades más estrechamente relacionadas con la erosionabilidad de un suelo.

4.11.1 Textura del suelo

Las partículas de arena son fácilmente separadas de los agregados por su falta de cohesión, pero presentan dificultad para ser transportadas por su relativo gran tamaño y peso. Las partículas de arcilla tienden a permanecer unidas entre sí y son difícilmente separables, pero son fácilmente arrastradas grandes distancias al ser separadas de los agregados. Suelos salinos generalmente presentan buenos agregados, pero éstos son fácilmente separados cuando se mojan y sus partículas individuales son fácilmente arrastradas (Troeh *et al.*, 1999; Becerra, 1999).

La tasa de infiltración y la permeabilidad se deben en buena medida a la textura del suelo. El agua se mueve rápidamente por los macroporos, pero lentamente por los microporos. Los poros grandes entre las partículas de arena permiten un rápido

movimiento del agua. Los poros finos o muy finos comunes en suelos de texturas intermedias o finas como los limos, las arcillas limosas y las arcillas, restringen el movimiento del agua. Es así que una lluvia moderada, generalmente produce más escorrentía superficial y erosión en suelos de textura fina que en suelos de textura arenosa (Lal *et al.*, 1999; Troeh *et al.*, 1999).

4.11.2 Estructura del suelo

Los agregados grandes y estables, hacen difícil la separación y transporte de las partículas de suelo, y lo vuelven más permeable. Los suelos arcillosos, generalmente tienen una pobre permeabilidad y bajas tasas de infiltración, pero cuando estas arcillas se encuentran formando buenos agregados, se acelera la velocidad de flujo del agua a través del suelo (Morgan, 1986).

La textura, el coeficiente de intercambio catiónico, el tipo de arcilla, el contenido de materia orgánica, el tipo de materiales cementantes diferentes a las arcillas y a la materia orgánica, y la historia de uso cultural del terreno, son otros factores que influyen en el tamaño y estabilidad de los agregados del suelo (Lal *et al.*, 1999; Troeh *et al.*, 1999).

4.11.3 Intercambio catiónico

Si el complejo de intercambio catiónico es ocupado principalmente por H^+ o cationes di o trivalentes, el coloide podrá flocular y las partículas del suelo se agregarán. Los agregados grandes y estables resisten la disgregación y el acarreo. Por otro lado, los coloides del suelo con grandes cantidades de Na^+ y K^+ o con excesivas cantidades de

Mg⁺⁺ pueden desflocular. Esta desfloculación de los coloides impide la formación de agregados y causa baja permeabilidad y alta erosionabilidad (Gollany *et al.*, 1991; Lal *et al.*, 1999).

4.11.4 Contenido de materia orgánica

La materia orgánica mejora la calidad de los agregados individuales y los hace más estables, y también mejora la permeabilidad y reduce los escurrimientos superficiales y la erosión (Oades, 1984; Gollany *et al.*, 1991).

4.11.5 Agentes cementantes

Algunos compuestos férricos ligan o unen arcillas y otras partículas de suelo de una forma estable en suelos con altos grados de lixiviación tanto en regiones templadas como en muchos suelos tropicales, lo que los hace muy resistentes a la erosión (Gollany *et al.*, 1991; Lal, 1999).

4.12 Otros aspectos relacionados con la erosionabilidad de un suelo

4.12.1 Historia cultural

Suelos con vegetación nativa o utilizados como pastizales, resisten bien la erosión. Esos suelos tienden a tener una estructura excelente y agregados relativamente grandes y estables. Las raíces se extienden a través de los agregados y grandes cantidades de hojarasca y residuos vegetales son reincorporados para conservar la estabilidad. La descomposición activa del material vegetal ayuda a desarrollar una estructura resistente. Los agregados de un suelo se vuelven más débiles y la erodabilidad se incrementa si no

se agrega materia orgánica regularmente y en cantidades adecuadas (Gollany *et al.*, 1991).

Un cultivo intenso reduce el contenido de materia orgánica y por lo tanto reduce también la estabilidad de los agregados, lo que favorece los procesos erosivos del suelo (Mann, 1986; Lal, 1999; Troeh *et al.*, 1999).

4.12.2 Pastoreo y erosión hídrica

El pastoreo generalmente origina cambios tanto en el suelo como en la vegetación presente. Las consecuencias hidrológicas de esos cambios, que algunas veces son fuertes y otras ligeros, dependen del tipo y grado de modificación de la cubierta vegetal, del tipo de cambios en el suelo y de las condiciones características de precipitación sobre el área en la que los cambios están teniendo lugar (Blackburn *et al.*, 1982; Morgan, 1986; Bernal, 1999; Troeh *et al.*, 1999).

La reducción de la cubierta vegetal incrementa el impacto de las gotas de lluvia, reduce la materia orgánica del suelo y agregados, incrementa el encostramiento de la superficie del suelo y reduce la tasa de infiltración (Wood y Blackburn, 1981; Savory, 2002²).

La modificación de las propiedades físicas del suelo por el pastoreo intenso, junto con la reducción en la cobertura vegetal, frecuentemente resultan en decremento de la

² Savory, A. Comunicación personal. Agosto, 2002. Chapa de Mota, Estado de México.

tasa de infiltración e incremento en la erosión (Blackburn, 1984). La alteración del tipo de vegetación, puede también incrementar las pérdidas de sedimentos (McCalla *et al.*, 1984).

Lal (1996), determinó los efectos de la deforestación, la labranza de “post desmonte” y sistemas de cultivos y pastoreo extensivo sobre las propiedades del suelo, de 1978 a 1987 en el suroeste de Nigeria, encontrando que la deforestación y los cambios en el uso del suelo causan cambios drásticos en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo, los cuales habían sido extremadamente favorables bajo el sistema boscoso antes de la tala. La densidad aparente y la resistencia a la penetración como indicadores de la compactación se incrementaron significativamente y con ello la infiltración se vio reducida debido al pisoteo del ganado (3 cabezas por hectárea).

Cuando se realizan pastoreos ligeros, el efecto sobre la cobertura vegetal es mínimo, afectándose principalmente la altura de las plantas. Las plantas con mayor gustosidad para los herbívoros son consumidas más ávidamente que las plantas menos apetecidas por ellos, lo que puede resultar en cambios en la composición florística de la cubierta vegetal. Bajo un aprovechamiento adecuado, se puede llegar a tener un balance adecuado de las especies presentes, de modo que también la cobertura vegetal proteja al suelo de una manera efectiva. Bajo un pastoreo pesado y particularmente cuando no se pone adecuada atención a cambios inminentes en la cobertura vegetal, los cambios subsecuentes pueden llegar a ser de consideración. Cuando las plantas más palatables y menos vigorosas o agresivas son consumidas por el ganado, mediante un pastoreo fuerte, éstas son reemplazadas paulatinamente por plantas mejor adaptadas para sobrevivir bajo esas condiciones. El sobrepastoreo y los pastoreos pesados o pastoreos de duración

prolongada, tienden a reducir la cubierta vegetal, decreciendo el número de plantas con raíz fibrosa, con lo que se reduce la cohesión física del suelo, lo que lo predispone a ser erosionado con mayor facilidad (Blackburn, 1984; Savory, 1990).

4.13 Parcelas de escurrimiento

Las parcelas o lotes de escurrimiento constituyen uno de los métodos más precisos para cuantificar la pérdida de suelo bajo diversas condiciones de uso del suelo. Se utilizan en experimentación, casi con exclusividad, debido a que en la mayoría de las ocasiones, los costos son altos, pero la información generada por este método ha sido de importancia decisiva para el desarrollo de las estimaciones numéricas de la erosión.

El método consiste en coleccionar el escurrimiento y los sólidos por él arrastrados, que se generan en una parcela o lote de dimensiones conocidas. La esorrentía es aislada de la del terreno adyacente colocando láminas de asbesto o un material similar alrededor de la parcela, en cuya parte inferior se colecta la esorrentía y se conduce por tubería a un tanque de almacenamiento (Figuerola, 1975; Becerra, 1999).

Diariamente, después de cada tormenta, hay que registrar el volumen colectado en el tanque, tomar muestras para cuantificar los sedimentos arrastrados desde la parcela y desalojar el agua del estanque con el fin de dejarlo listo para coleccionar la producción de sedimentos en el evento pluvial siguiente (Becerra, 1999).

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Descripción del área de estudio

5.1.1 Localización, extensión y límites

El estudio se realizó durante el año 2002 en el Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agrosilvopastoril de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la U.N.A.M., localizado en el kilómetro 68.5 de la carretera Atizapán-Jilotepec, en el municipio de Chapa de Mota, Estado de México (Figura 1). Dicho municipio se encuentra ubicado al Norte del Estado de México y colinda con los siguientes municipios: hacia el Norte con Jilotepec, al Sur con Morelos, al Este con Villa del Carbón y al Oeste con Timilpan y Morelos. Se ubica en la carta topográfica TEPEJI DEL RÍO E14A18, escala 1:50 000.

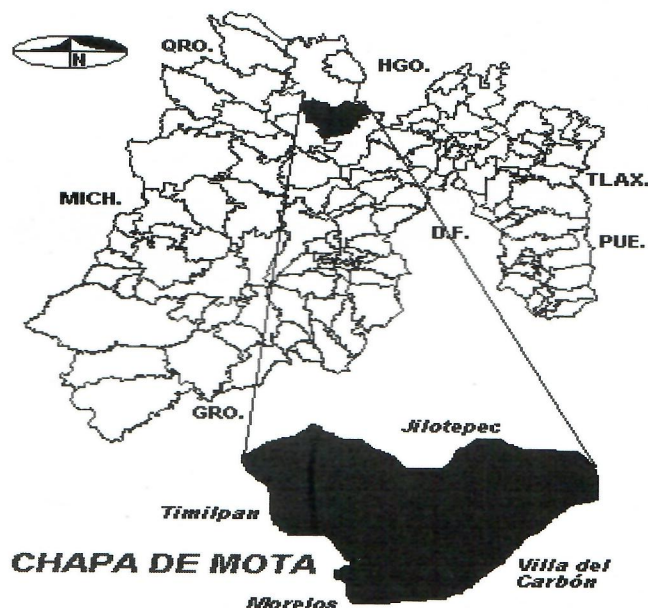


Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Chapa de Mota, en el Estado de México.

5.1.2 Clima

De acuerdo con el sistema de Köppen, modificado por García (1981), el clima del municipio de Chapa de Mota, queda definido como C(w₂) (w) b (i'), caracterizado por un clima templado, el más húmedo de los subhúmedos, con temperatura media anual de 14°C y una precipitación media anual de 900 mm y régimen de lluvias en Primavera-Verano (INEGI, 1991); el 80 % de la precipitación total se presenta en los meses de julio, agosto, septiembre y primera quincena de octubre, con una máxima precipitación histórica (desde mayo de 1996 al 2 de diciembre del 2002) de 70 mm en 24 horas (CEIEPASP, 2003).

5.1.3 Hidrología

El municipio de Chapa de Mota pertenece a la región hidrológica del Alto Pánuco, y la confluencia de los Ríos San Rafael y San Jerónimo, es el origen del Río Pánuco. Existen numerosos arroyos de temporal y 15 manantiales. La presa Danxho, con capacidad de almacenamiento de 20.6 millones de m³ y la presa de la Concepción con capacidad de 3.1 millones de m³ de agua, son los principales embalses municipales (Baca y García, 1999).

5.1.4 Suelos

De acuerdo con el sistema de clasificación de la FAO-UNESCO, el suelo dominante se clasifica como *Feozem húmico* de origen ígneo, profundo, con pH ácido (4.7 a 6.1), contenido de materia orgánica de moderado a alto y drenaje interno y externo moderado (COTECOCA, 1998).

5.1.5 Vegetación

El área de estudio presenta un bosque latifoliado esclerófilo caducifolio en planos inclinados y lomeríos (Figura 2), que se encuentran bajo un Programa de Aprovechamiento Forestal Persistente.



Figura 2. Vista panorámica del bosque del área de estudio en el CEIEPASP, en Chapa de Mota, Estado de México.

El bosque está integrado por las siguientes especies vegetales: en el estrato arbóreo, por Encinos (*Quercus crassifolia* Humb., *Q. rugosa* Née. y *Q. laurina* Humb. et Bonpl.), Madroño (*Arbutus glandulosa* HBK), Tejocote (*Crataegus pubescens* HBK), Capulín (*Prunus serotina* var. *capuli* Ehrh.), Pino Ocote (*Pinus teocote* Schltdl. et Cham.) y Tepozán (*Buddleia cordata* HBK); en el estrato arbustivo, se encuentra Hierba

de la paloma (*Stevia salicifolia* Cav.), Hierba mora (*Monnina schlechtendaliana* D. Dietr.), Escoba (*Baccharis conferta* HBK), Perlilla (*Fucsia sp.*); y en el estrato herbáceo por Zacatón (*Muhlenbergia macroura* (Kunth) Benth., *M. sp.*), Triguillo del pinar (*Piptochaetium fimbriatum* HBK A. Hitchc.), *P. virescens* HBK, *Nassella leucotricha* Trin. et Rupr., Zacate Lobero (*Lycurus phleoides* Kunth.), *Festuca sp.*, *Aegopogon cenchroides* Humb. et Bonpl. ex Willd., *Bromus inermes* L., *Brachipodium sp.*, *Panicum bulbosum* Kunth. y *Aristida schiedeana* Trin. et Rupr. (Vega y Mendoza, 2001; Bernal, 1999) (Figura 3).



Figura 3. Estructura vegetal del bosque del área de estudio en el CEIEPASP, en Chapa de Mota, Estado de México.

5.2 Parcelas para el estudio de la erosión del suelo

Para el estudio del efecto del pastoreo sobre el escurrimiento del agua de lluvia y de la erosión del suelo, se utilizaron cuatro parcelas en condiciones edáficas, de pendiente y de cobertura por mantillo y vegetación similares, y orientación hacia el poniente.

5.2.1 Delimitación de parcelas

Para evitar que se mezclaran escurrimientos del terreno aledaño, en la parte superior y en las partes laterales de la parcela se colocó una barrera de lámina de metal. Las láminas se enterraron a una profundidad de 25 cm, sobresaliendo 15 cm sobre el terreno (Figura 4).



Figura 4. Detalle del establecimiento de parcelas de escurrimiento para el estudio de la erosión del suelo, en Chapa de Mota, Estado de México.

5.2.2 Determinación de la superficie y de la pendiente de las parcelas

El área de cada una de las parcelas se determinó utilizando el método de la triangulación, que consiste en formar triángulos sobre la superficie de cada parcela, con la ayuda de hilo, estacas y flexómetro. Se midieron los lados de cada triángulo, y con la fórmula de Spiegel (1979) se obtuvo el área de cada uno de ellos. Con la suma del área de cada triángulo trazado dentro de la parcela, se obtuvo la superficie total con la Fórmula 1. La pendiente de cada parcela, se determinó utilizando una manguera de 8 metros, a manera de nivel “tipo albañilería.”

$$a = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

a = área

$$s = \frac{a + b + c}{2} = \text{semiperímetro}$$

a, b, c = lados

5.3 Forma de pastoreo

El bosque se pastoreó con una manada mixta compuesta por 41 bovinos, 96 ovinos, 36 caprinos, 15 porcinos y 4 equinos (Figura 5). El pastoreo se controló con el auxilio de un cerco eléctrico portátil de 2 hilos de polifilamento, en superficies de asignación de aproximadamente 2 500 m². Se ajustó la carga animal, por tiempo, según la carga predeterminada para cada uno de los tratamientos modificando el tiempo de

ocupación de la parcela por parte de la manada, para definir la carga animal instantánea. La equivalencia en Unidades Animal, se muestra en el Cuadro A1 del Apéndice.

El terreno donde se establecieron las cuatro parcelas, fue pastoreado por última vez, del 15 al 19 de diciembre del 2001. En este estudio, las cargas animal utilizadas, asociadas a cada tratamiento fueron las siguientes:

- Pastoreo con *densidad animal instantánea alta* (**1 067.9 UA/ha**). Con un tiempo de permanencia de la manada en la parcela de **55 minutos**, (*Tratamiento 1*).
- Pastoreo con *densidad animal instantánea intermedia* (**519.07 UA/ha**). Con un tiempo de permanencia de la manada en la parcela de **28 minutos**, (*Tratamiento 2*).
- Pastoreo con *densidad animal instantánea baja* (**347.25 UA/ha**). Con un tiempo de permanencia de la manada en la parcela de **19 minutos**, (*Tratamiento 3*).
- Parcela *sin pastoreo*. Parcela Testigo, (*Tratamiento 4*).

El pastoreo se llevó a cabo el 30 de agosto del 2002 en las tres parcelas, de manera consecutiva y por una sólo ocasión en cada parcela, utilizando los mismos animales, iniciando en T1 y terminando en la parcela T3.

En la Figura 5, se observa una parte de la manada, pastoreando una de las parcelas experimentales; en un primer plano, se distinguen las dos líneas del alambre del cerco eléctrico, y bajo estas, la lámina utilizada para delimitar cada parcela y para conducir el escurrimiento superficial de agua.



Figura 5. Vista de la manada mixta, pastoreando una de las parcelas en estudio. Se observan las líneas de cerco eléctrico y las láminas para separar y conducir escurrimientos superficiales de agua. Chapa de Mota, Estado de México.

5.4 Mediciones y determinaciones realizadas

A lo largo del estudio, se realizaron las determinaciones siguientes: cobertura vegetal del suelo, en los estratos herbáceo, arbustivo y arbóreo; cobertura del suelo por mantillo, profundidad y peso fresco y seco del mismo; resistencia del suelo a la penetración a cuatro diferentes profundidades; escurrimiento superficial, pérdida de

suelo por arrastre, pérdida de NO_3^- y de K por arrastre en el agua escurrida; y precipitación pluvial.

Las determinaciones se realizaron en tres ocasiones: 1) La primera determinación fue hecha una semana antes del pastoreo; 2) La segunda, una semana después del pastoreo; y 3) La tercera, tres meses después del pastoreo, con el fin de encontrar posibles cambios provocados por el pastoreo y por las variaciones naturales en el tiempo.

5.4.1 Cobertura vegetal del suelo

La cobertura vegetal se determinó en los estratos herbáceo, arbustivo y arboreo.

Se consideró estrato herbáceo a las plantas con una altura máxima de 45 cm a partir del suelo; el estrato arbustivo hasta los 2.5 metros de altura, y el arbóreo para árboles con más de 2.5 metros de altura.

Para el muestreo de la cobertura del estrato herbáceo, se utilizó un cuadro de metal de un m^2 , realizándose las mediciones al azar, con tres repeticiones por tratamiento. Se determinó área o cobertura basal, cobertura aérea, altura y la especie. La determinación del porcentaje de cobertura vegetal se determinó cuantificando la superficie de cada m^2 cubierta por hierbas y expresándola en porcentaje. En los sitios de las tres repeticiones ubicados para el primer muestreo, se colocaron estacas, para realizar en ese mismo lugar el segundo y tercer muestreo, y así obtener cambios confiables en cobertura.

Para la determinación de la cobertura arbustiva, se ubicaron al azar, en cada parcela, tres cuadros de cuatro metros por lado, determinando la cobertura basal, la

cobertura aérea, la altura y la especie de cada una de las arbustivas presentes en cada cuadro. Los tres muestreos se realizaron en los mismos sitios. La determinación del porcentaje de cobertura vegetal arbustiva se determinó cuantificando la superficie de cada cuadro de 16m² cubierta por arbustivas y expresandola en porcentaje

La cobertura arbórea se determinó mediante el método de intercepción en línea Canfield. En cada tratamiento, se fijaron dos transectos de 25 metros de largo cada uno, tanto en el sentido de la pendiente como en el sentido perpendicular de la misma, buscando que los dos transectos se cruzaran formando una cruz a los 12.5 metros de cada uno. Se registró el punto de intersección sobre la línea, la longitud abarcada por cada individuo sobre la línea, la anchura máxima del individuo en dirección perpendicular a la línea, la altura y la especie del individuo.

La cobertura se obtuvo sumando la longitud sobre la línea abarcada por cada individuo en cada una de las líneas y obteniendo el porcentaje correspondiente de los 25 metros totales de cada línea.

5.4.2 Mantillo

Se hicieron 3 mediciones por parcela, ubicándolas 2 metros con dirección Este de los sitios para cada muestreo para cobertura herbácea usando el marco de metal de un m², con rejilla con celdas de 10 centímetros por lado (Figura 6), colocándola sobre el suelo y determinando el porcentaje de la superficie del suelo cubierta por mantillo, material pétreo y vegetación; la profundidad del primero y su composición.

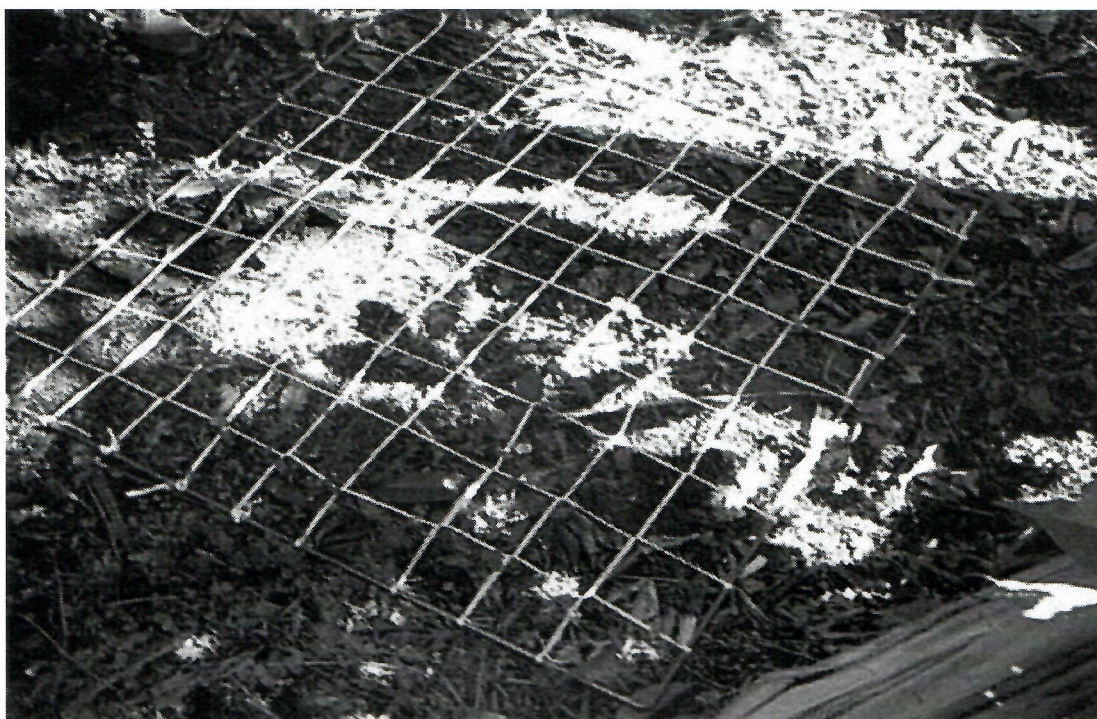


Figura 6. Cuadro de un metro por lado, para la determinación de la cobertura del suelo por mantillo. Chapa de Mota, Estado de México.

La profundidad del mantillo se midió en centímetros, realizando tres observaciones para cada repetición, y promedios para cada uno de los tratamientos. La composición se determinó según los elementos principales que lo constituían (hojas o ramas) (Figura 7).

Se tomó una muestra del mantillo de 0.25 m^2 en cada repetición. Posteriormente, se separaron las ramas con diámetro mayor de 1 cm, y se pesó por separado tanto ramas como el resto del mantillo en fresco. Después se sometieron las muestras a deshidratación a una temperatura de 75° C por 24 horas, usando una estufa de aire forzado. Finalmente, se volvió a pesar el mantillo.



Figura 7. Mantillo conformado principalmente por hojas, frutos y ramas de encino. Chapa de Mota, Estado de México.

5.4.3 Resistencia del suelo a la penetración

La resistencia del suelo a la penetración, se midió utilizando un penetrómetro manual de la marca *Eijkelkamp*. El procedimiento seguido en la medición de la resistencia a la penetración, fue el siguiente:

Para cada una de las cuatro parcelas, se realizaron tres repeticiones, ubicando los sitios para las mediciones hechas antes del pastoreo, a dos metros en dirección Sur, de los sitios utilizados para determinar cobertura herbácea.

En cada repetición, se hicieron mediciones a 0, 10, 30 y 60 centímetros de profundidad, y se realizaron 25 determinaciones de resistencia a la penetración por cada

uno de los tres muestreos por parcela. En cada repetición, se procedió a retirar el mantillo, hasta dejar expuesta la superficie del suelo, en un área de aproximadamente 0.25 m^2 . Las mediciones se iniciaron en el sentido de Sur a Norte, en cada uno de estos cuadros de terreno, con la primera lectura realizada en la esquina Suroeste de cada sitio, hasta llegar sobre una misma línea imaginaria a la quinta medición; la sexta medición se hizo al costado Este de la primera medición (Figura 8).



Figura 8. Determinación de la resistencia del suelo a la penetración. Chapa de Mota, Estado de México.

De este modo se siguió hasta la medición 25, con una distancia entre medición y medición de aproximadamente 3 centímetros, con el fin de que no hubiera afectación de las mediciones, por el efecto de compactación o remoción de tierra por determinaciones

aledañas. Después de la lectura de cada medición, se eliminó la tierra de la punta del penetrómetro.

Dado que el suelo de las parcelas de escurrimiento fue clasificado con una textura franco-limosa, se escogió el cono del # 5 para el penetrómetro.

Para las mediciones a 0, 10 y 30 centímetros, se usó el penetrómetro con una sola varilla; para las mediciones a 60 centímetros se conectaron 2 varillas con el fin de que el operador del penetrómetro no tuviera que modificar la posición en la que hizo las anteriores lecturas a profundidades menores.

Para realizar las mediciones, el operador del penetrómetro se colocó parado fuera del cuadro de 0.25 m² del que se tomaron las lecturas, viendo hacia el Este. La aguja lectora fue puesta en el número 0 del manómetro antes de cada lectura; el penetrómetro se tomó firmemente por los dos mangos, se colocó el cono en la superficie del suelo, teniendo cuidado de que el aparato estuviera en la mayor verticalidad posible, y se ejerció presión firme y uniforme, hasta que el cono penetrara hasta su base en el suelo. Después, se obtuvo la medición de la aguja lectora, se registró, se limpió el cono, se regresó la aguja lectora a la posición 0 (cero) y se procedió a hacer la siguiente medición, hasta concluir con la número 25 de cada profundidad.

El segundo muestreo se ubicó a 4 metros de los sitios usados para el primer muestreo, en dirección hacia el centro de cada parcela. El tercer muestreo se ubicó a tres metros en dirección Noreste de los sitios ubicados para la segunda medición.

5.4.4 Precipitación

La precipitación pluvial fue medida diariamente a partir del primer día del mes de enero del 2002 y hasta el 31 de diciembre del mismo año. Se utilizó un pluviómetro manual con capacidad para 250 mm, marca *Osterizer*. La medición de la precipitación se hizo en milímetros.

5.5 Escurrimiento superficial

Para medir el escurrimiento se colocó en cada una de las cuatro parcelas, un vertedor tipo “H” con capacidad de 12 L s^{-1} y tres tanques colectores escalonados, dispuestos en el siguiente orden:

Tanque número uno, con 20 ventanas. Directamente conectado a la boquilla del vertedor. Cuando el volumen de agua colectado en este tanque sobrepasó el nivel máximo de almacenamiento, el agua restante se derramó en partes iguales en cada una de las 20 ventanas; el líquido de una de esas ventanas fue dirigido mediante una canaleta en desnivel, hacia el “tanque número dos”.

Tanque número dos, con diez ventanas. Este tanque captó la vigésima parte del agua derramada por las ventanas del tanque número uno. Cuando el volumen del agua colectada en este tanque, sobrepasó su nivel máximo de almacenamiento, el agua restante se derramó en partes iguales por cada una de las diez ventanas, y el agua que salió por una de ellas, fue conducida mediante una canaleta de metal colocada a desnivel hasta el “tercer tanque”.

Tanque número tres, sin ventanas. Este tercer tanque fungió como tanque de seguridad en el caso de que el agua escurrida en cada parcela, llenara el tanque número dos, lo cuál no sucedió en ningún tratamiento.

Diariamente, alrededor de las 08:00 horas, después de un día lluvioso, se acudió a las parcelas y en los casos en los que hubo escurrimiento, se midió con una regla la lámina de agua captada en los tanques, anotando los datos en una libreta de campo. Una vez determinado lo anterior, se agitó el agua del tanque número uno, para hacer una suspensión con los sólidos arrastrados por el agua escurrida y posteriormente se tomó una muestra del agua (aproximadamente un litro por parcela). Después, se tiró el agua de los tanques, dejándolos vacíos, limpios y nivelados para captar el siguiente escurrimiento.

Las fechas de los escurrimientos fueron las mismas en que se tomaron las muestras, es decir, el día siguiente a la precipitación correspondiente.

Para obtener los volúmenes colectados en los tanques (Figura 9), estos fueron aforados previamente a ser instalados en campo.

Se expresó la cantidad de agua en litros, que correspondían a cada centímetro sobre la pared de cada tanque haciéndolo en el sentido del fondo del tanque hacia la boca del mismo.

El volumen de agua escurrida por tratamiento y captada por los tanques (Figura 9), se expresó en litros (l) y en lámina (cm), y se multiplicó por el área (m^2) de cada parcela

experimental obteniendo así el volumen escurrido en m³. El escurrimiento también fue expresado por hectárea, tanto en volumen como en lámina.



Figura 9. Captadores de escurrimiento de agua de lluvia y pérdida de suelo colocados en las cuatro parcelas en Chapa de Mota, Estado de México. Año 2002.

5.6 Determinación del coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento se determinó en función de la relación entre el volumen escurrido y el volumen llovido, utilizando la Fórmula 2:

$$Ce = \frac{Q}{P} 100 \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

Ce = Coeficiente de escurrimiento (%)

P = Precipitación total (mm)

Q = Volumen total escurrido (mm)

5.7 Infiltración

Para determinar la velocidad de infiltración del agua en el suelo, se utilizó el método de doble cilindro. En cada parcela se realizaron tres repeticiones en cada uno de los tres muestreos (una semana antes del pastoreo, una semana después del pastoreo y tres meses después del pastoreo). Las mediciones del agua infiltrada se realizaron cada minuto desde el momento cero hasta el minuto cinco, y posteriormente cada cinco minutos hasta llegar a una velocidad de infiltración constante (siempre se hicieron lecturas por lo menos hasta el minuto 110).

Para ajustar la velocidad de infiltración se usó la Ecuación de Kostiakov (1932).
Fórmula 3.

$$I = Kt^n \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

I = Velocidad de infiltración (cm h^{-1})

t = Tiempo (min)

K = Parámetro que representa la velocidad de infiltración durante el intervalo inicial (cuando $t = 1$).

n = Parámetro que como la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo.

Con los datos de velocidad de infiltración: I y t se obtienen los parámetros n y K , generados por regresión lineal. El método se basa en un ajuste de los datos de campo de la curva de infiltración al modelo $I = Kt^n$. Si esta ecuación se expresa logarítmicamente, con el objeto de linealizarla, se obtiene la Fórmula 4:

$$\text{Log } I = \text{Log } K + n \text{ Log } t \dots\dots\dots (4)$$

La que tiene la misma forma que el modelo (Fórmula 5):

$$y_i = b_0 + b_1 x_i \dots \dots \dots (5)$$

Que es un modelo de regresión lineal simple, para expresar (3) en términos de (4).

Luego:

$$\text{Log } I = Y_i$$

$$\text{Log } K = b_0$$

$$n = b_1$$

$$\text{Log } t = X_i$$

5.8 Pérdida de nutrientes por escurrimiento

Para determinar la pérdida de nutrientes por escurrimiento, se analizaron en laboratorio ocho muestras de agua escurrida (Figura 10), correspondientes a dos eventos de lluvia de cada uno de los cuatro tratamientos. Se determinaron nitratos (NO_3^-) y potasio soluble (K^+), y posteriormente, se calculó la pérdida de nitratos (NO_3^-) y de potasio soluble (K^+), por parcela y por hectárea.



Figura 10. Recolección de las muestras de escurrimiento y sedimento. Chapa de Mota, Estado de México.

5.9 Pérdida de suelo

La pérdida de suelo se determinó en el laboratorio, a partir de la concentración de sedimentos encontrada en cada una de las muestras de agua tomadas en cada tratamiento. Los resultados se expresaron en gramos por litro, kilogramos por parcela de escurrimiento, y en kilogramos por hectárea.

En laboratorio, a cada uno de los botes con muestras, se le aplicó una solución de alumbre (iones Al^{+++}) al 1%, para sedimentar los sólidos de la muestra y posteriormente separarlos del agua por decantación. Se agregaron diez gramos de alumbre sólido por cada 1 000 mililitros de agua. El agua con el alumbre se vertió en un vaso de

precipitados y se calentó con ayuda de una parrilla eléctrica, durante cinco minutos, sin permitir que el agua entrara en ebullición. Durante este tiempo, se agitó continuamente el agua hasta que el alumbre se disolvió por completo. A cada una de las muestras, se le aplicó esta solución en proporción de 1:100, es decir, diez mililitros de solución a cada 1 000 mililitros de muestra. Se dejó reposar por 24 horas y posteriormente se eliminó el agua de cada muestra hasta dejar al sedimento con la menor cantidad de agua posible. Este sedimento se pasó a frascos de vidrio debidamente identificados, y se secaron en una estufa de aire forzado a una temperatura de 105°C durante 48 horas (Figura 11). Posteriormente, se pesaron los frascos junto con el sedimento seco, y el peso de éste se obtuvo por diferencia al restar al peso inicial, el peso del frasco sin sedimento y perfectamente limpio y seco.

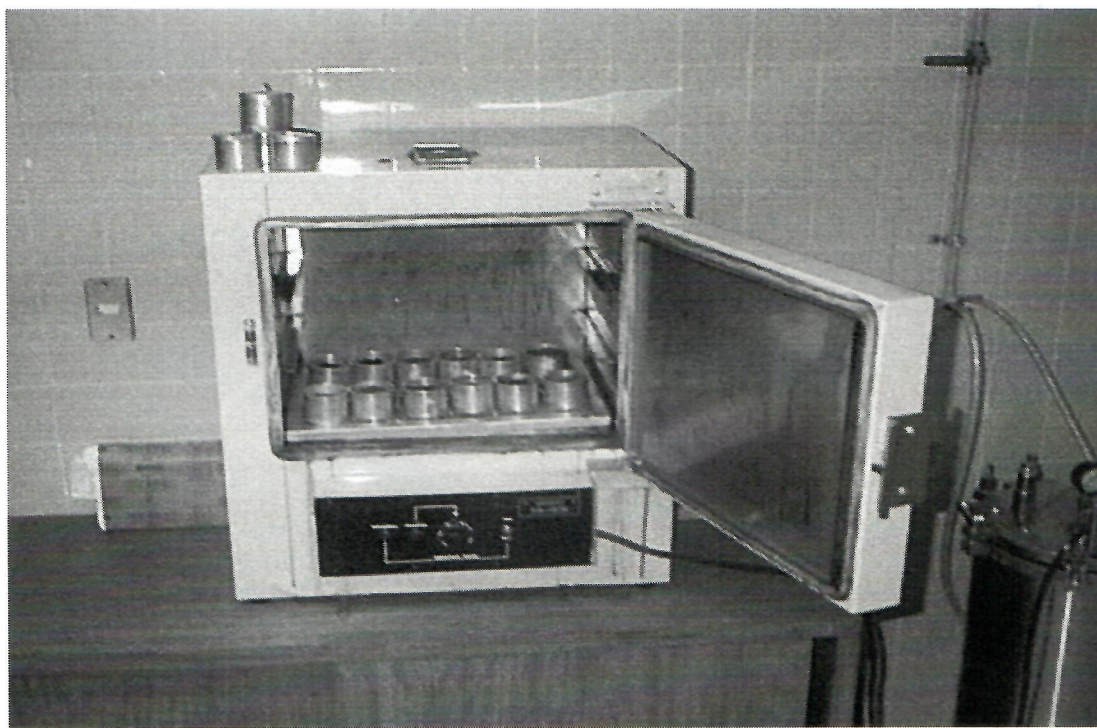


Figura 11. Secado de muestras para determinación de sedimento, con un horno de extracción de aire forzado. Chapa de Mota, Estado de México.

Finalmente, se obtuvo el peso de los sedimentos mediante el uso de una balanza digital, para calcular con base al escurrimiento registrado en cada parcela, la pérdida total de suelo por evento de lluvia. La salida de sedimentos por tratamiento, fue expresada en gramos por litro de muestra, en kilogramos por parcela de escurrimiento y en kilogramos por hectárea.

La pérdida de suelo se relacionó con la precipitación, el escurrimiento, la velocidad de infiltración, la resistencia al penetrómetro, la longitud y grado de pendiente, la pérdida de nutrimentos y la cobertura arbórea, arbustiva, herbácea y superficial, con el fin de obtener parámetros que contribuyeran a explicar su comportamiento.

Para la captura electrónica y el análisis de todos los datos, se utilizó el programa *Excel versión XP®*.

6 RESULTADOS

Los resultados que a continuación se presentan, corresponden al análisis de los datos tomados entre los meses de junio a noviembre del 2002, en un área sometida a pastoreo intensivo en manada, en un predio bajo bosque de encino en el municipio de Chapa de Mota, Estado de México. El análisis comprendió la caracterización de las parcelas experimentales, la precipitación, las tasas de infiltración del agua de lluvia, las tasas de escurrimiento del agua de lluvia, las tasas de pérdida de suelo y de nutrientes (NO_3^- y K) relacionadas con el pastoreo efectuado.

6.1 Caracterización de las parcelas experimentales

6.1.1 Superficie y pendiente de las parcelas

Las cuatro parcelas estudiadas fueron ubicadas en un solo bloque perpendicular en relación a la pendiente del terreno. La superficie, el grado y longitud de la pendiente del terreno de las parcelas, se presenta en el Cuadro 1. Se trabajó con parcelas más o menos uniformes en superficie y en grado y longitud de pendiente.

Cuadro 1. Superficie y pendiente de las parcelas experimentales, en Chapa de Mota, Estado de México.

Densidad Animal Instantánea por tratamiento (UA/ha)	Superficie (m ²)	Pendiente (%)	Longitud de la pendiente (m)
T1 (1 067.9)	2 817.64	72.5	51
T2 (519.07)	2 888.57	78	52.5
T3 (347.25)	2 954.61	74	51.7
T4 (0)	2 920.29	71	51.3

6.1.2 Características físicas del suelo de las parcelas

Al ocupar el bloque de las cuatro parcelas una superficie relativamente pequeña y aparentemente uniforme en cuanto a vegetación, pendiente, cobertura de mantillo, orientación, etc., sólo se mandó al laboratorio una muestra combinada de suelo de las dos parcelas de los extremos del bloque, y el análisis que se muestra en el Cuadro A2 del Apéndice, indica que es un suelo franco limoso, con muy bajo porcentaje de arcilla (6.3%). Se determinó que el suelo pertenece a un Feozem húmico, moderadamente profundo (un metro), con una humedad aprovechable del 40%.

6.1.3 Características químicas del suelo de las parcelas

El suelo presenta una adecuada Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), debido, en parte, a un moderadamente alto contenido de materia orgánica (6.32 %), aunque bajas concentraciones de NO_3^- y de K, resultado quizá de los altos contenidos de humedad en el suelo y a la lixiviación de dichos nutrimentos.

6.2 Cobertura

6.2.1 Cobertura de mantillo

El suelo de las parcelas de los cuatro tratamientos, mostró porcentajes altos de suelo cubierto por mantillo (Figura 12), en el muestreo realizado antes del pastoreo en T1= 100 %, T2=92.66 % T3=86.83 %, y T4=95.5%, porcentajes que se redujeron después del pastoreo en T1=75.66 % y T2=81.0 %; mientras que la cobertura aumentó en T3=88.3 % y T4=98.66 %, debido en el caso de T4 a que no hubo pastoreo en esa parcela. En el muestreo realizado a los tres meses del pastoreo, se observó un aumento

en el porcentaje de suelo cubierto por mantillo, en los cuatro tratamientos (T1=88.33 %, T2=87.66 %, T3=89.66 %, y T4=99%) (Cuadro A3 del Apéndice), debido a que el género dominante en este bosque es el *Quercus* spp., cuyos árboles se defolian a partir del mes de octubre, lo que produjo un aumento en la cobertura del suelo por mantillo debido a la caída de hojarasca.

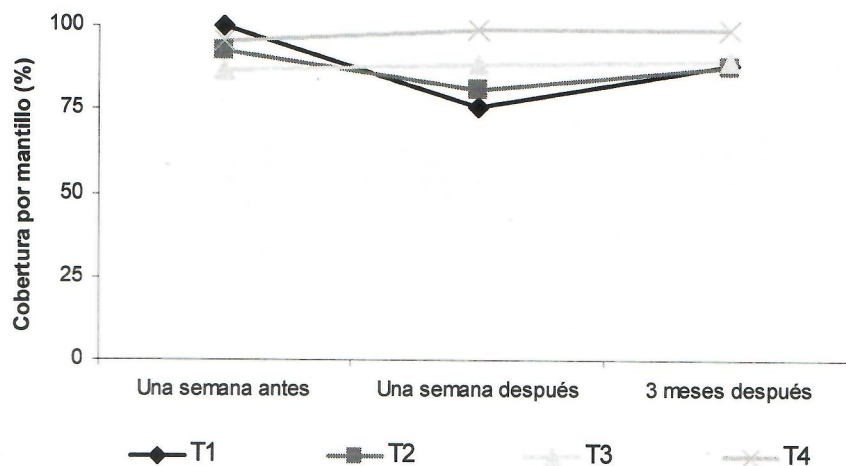


Figura 12. Cobertura del suelo por mantillo, por tratamiento, en Chapa de Mota, Estado de México.

Con respecto a la profundidad del mantillo, antes del pastoreo, se encontraron los siguientes promedios: T1 = 4.16 cm, T2 = 4.0 cm, T3 = 5.0 cm, y T4 = 4.3 cm. El grosor del mantillo después del pastoreo (Figura 13), se redujo considerablemente en las parcelas sometidas a pastoreo: T1 = 3.0 cm, T2 = 3.63 cm y en T3 = 2.76 cm, mientras que en T4 = 4.2 cm, prácticamente no hubo variación. Esta reducción en el grosor del mantillo, se atribuye a la fractura y compactación de la hojarasca debido al pisoteo por parte del ganado, y a que este, comió frutos (bellotas y tejocotes) presentes en el mantillo. A los tres meses del pastoreo, se observó un aumento en el grosor del mantillo,

con respecto a la profundidad encontrada en el muestreo realizado una semana después del pastoreo (T1 = 4.2 cm, T2 = 3.93 cm, T3 = 3.2 cm y T4 = 4.46 cm), debido a la caída otoñal de la hoja de encino.

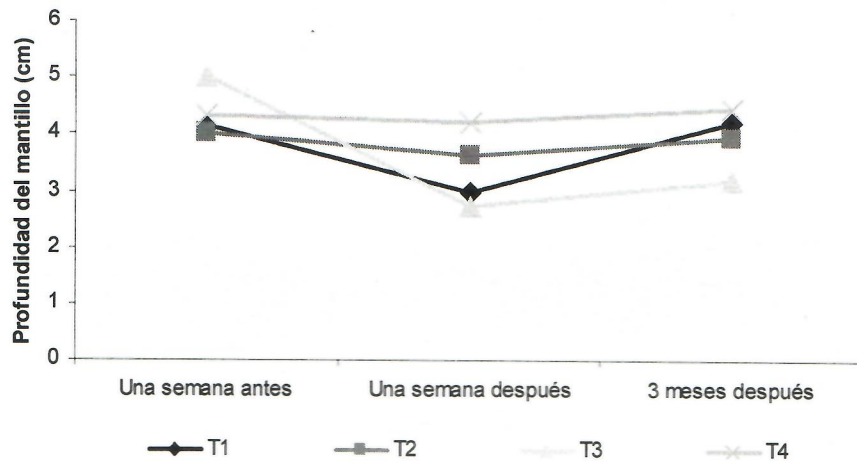


Figura 13. Profundidad del mantillo por tratamiento, antes y después del pastoreo, en Chapa de Mota, Estado de México.

6.2.2 Cobertura herbácea

Los porcentajes de suelo cubierto por componentes vegetales, se vieron modificados por el pastoreo, en los estratos herbáceo y arbustivo.

Para el estrato herbáceo, se determinó la cobertura basal y aérea, considerando como cobertura basal, la superficie del suelo ocupada por los tallos, y la cobertura aérea como el área de terreno que cubren las hojas. Se obtuvieron los resultados que se presentan en el Cuadro A4 del Apéndice y en la Figura 14.

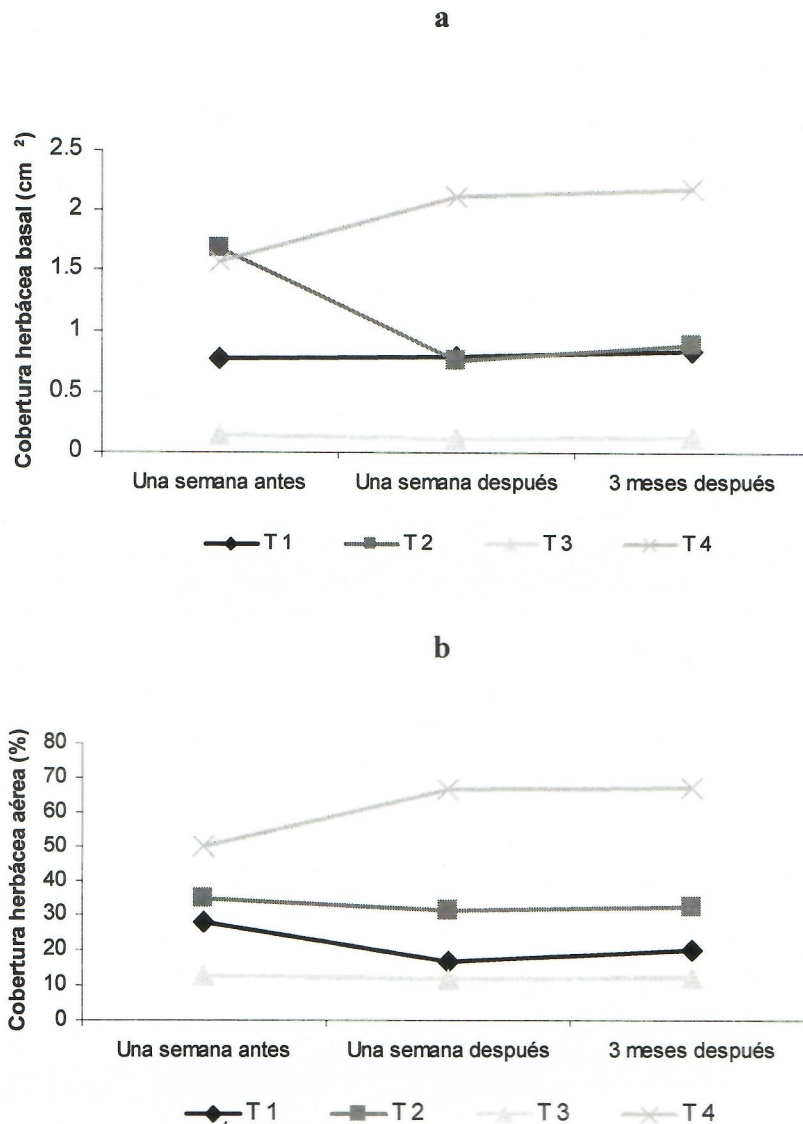


Figura 14. Cobertura herbácea basal (a) y aérea (b) por tratamiento, en un bosque de encino en Chapa de Mota, Estado de México.

Tanto la cobertura herbácea basal como la aérea se redujeron o al menos no se incrementaron después del pastoreo en los tratamientos T1, T2 y T3, comparados con el tratamiento T4. En este último tratamiento, se observó un aumento en la cobertura basal y aérea en el estrato herbáceo, debido a que no fue pastoreado y a que en el mes de agosto se presentó una tasa de muy rápido crecimiento de la vegetación. Dicho periodo

se extendió hasta principios de octubre, lo que explica la recuperación de la cobertura herbácea aún en los tres tratamientos pastoreados (T1, T2 y T3). Esta recuperación se observó aparentemente lenta debido al pastoreo sufrido y la consecuente pérdida de área foliar (fotosintética) tanto aérea como radical.

6.2.3 Cobertura arbustiva

En el Cuadro A5 del Apéndice, se presentan los datos de cobertura del estrato arbustivo. El comportamiento de la cobertura arbustiva basal (Figura 15) fue similar en T1, T2 y T3, tratamientos en los que se observó una ligera reducción en el porcentaje de cobertura en el muestreo realizado una semana después del pastoreo, debido más que al consumo por parte de los animales, al pisoteo, fractura de tallo y a que algunos arbustos fueron arrancados desde la raíz por los animales, aunque estos factores de influencia no fueron medidos en este trabajo.

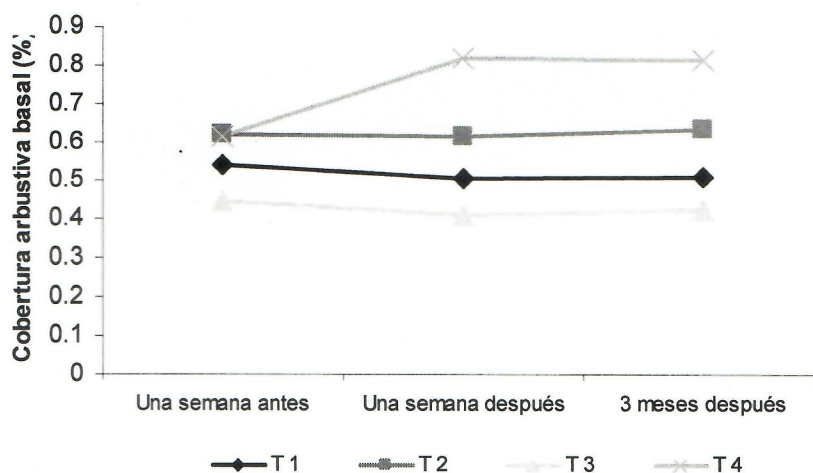


Figura 15. Cobertura arbustiva basal, por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

Con respecto a la cobertura arbustiva aérea (Figura 16), T2 y T3 presentaron un comportamiento similar; ligera reducción en el porcentaje de cobertura, después del pastoreo, con una también ligera tendencia hacia la recuperación de la cobertura en el muestreo realizado tres meses después del pastoreo, en tanto que en el tratamiento en el que se utilizó una mayor carga animal instantánea (T1), se presentó un marcado descenso en el porcentaje de cobertura aérea, en el muestreo realizado una semana después del pastoreo, con una tendencia a la recuperación, en el muestreo hecho tres meses después del pastoreo. La cobertura en la parcela testigo (T4) fue en aumento tanto en el segundo (una semana después del pastoreo) como en el tercer muestreo (tres meses después del pastoreo), debido a que las fechas de muestreo coinciden con la época del año de mayor crecimiento y rebrote. Esta tendencia a la recuperación en los tratamientos pastoreados, puede ser influenciada también, por el mismo ramoneo que promueve el rebrote acelerado, lo que concuerda con lo observado por Bernal (1999) y Hodgson (1990), además de que la época de pastoreo coincidió con la época de mayor producción de hojas por parte de la vegetación de las parcelas estudiadas.

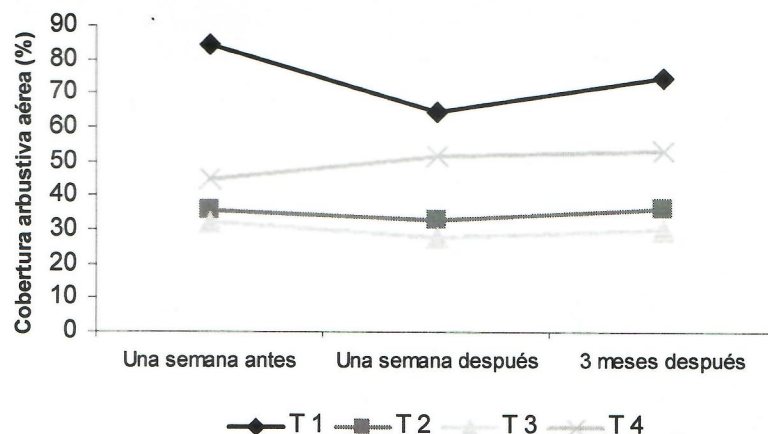


Figura 16. Cobertura arbustiva aérea, por tratamiento, en un bosque de encino en Chapa de Mota, Estado de México.

6.2.4 Cobertura arbórea

En el Cuadro A6 del Apéndice, se presentan los datos de cobertura arbórea. Como se observa en la Figura 17, el dosel arbóreo estuvo en un rango que varió entre el 60 y el 100% de cobertura, durante todo el periodo de estudio. La menor cobertura arbórea se presentó en T2, con un valor ligeramente superior al 60%.

La cobertura arbórea, mostró durante todo el periodo de estudio, un comportamiento uniforme (Figura 17), sin cambios sustanciales en ningún tratamiento, ya que el ramoneo fue mínimo, debido a la altura del dosel (5 a 15 metros) y posiblemente también, por el bajo consumo de especies arbóreas por la manada.

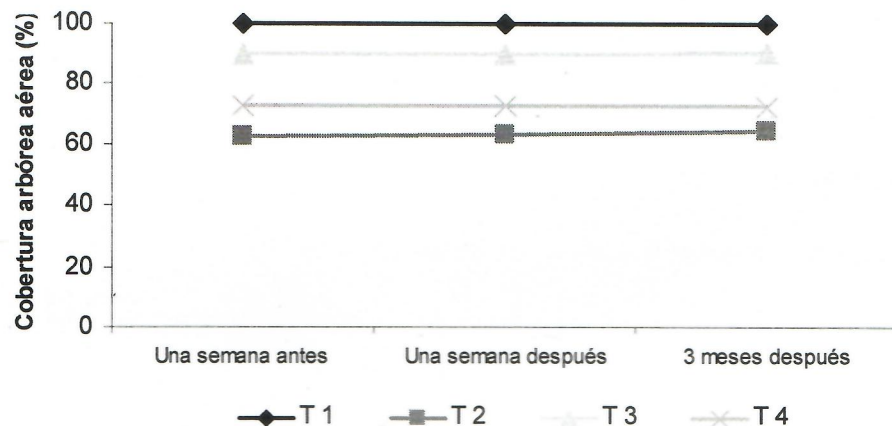


Figura 17. Cobertura aérea arbórea, por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

La altura a la que los animales consumieron forraje, está en función de la especie animal de la que se trate, por los hábitos de consumo específicos determinados por características anatomofisiológicas y selección forrajera por parte de los animales, y en

este caso, en función del tiempo de ocupación de cada parcela, el cual fue muy reducido incluso en el tratamiento 1, en el que permanecieron por espacio de 55 minutos.

También resulta obvio que no se modificara la cobertura arbórea, ya que el dosel se encontraba a una altura de entre cinco y quince metros, y la altura máxima a la que los animales de la manada consumieron follaje, no sobrepasó los dos metros. Aunado a esto, la masa arbórea estuvo constituida por especies de crecimiento moderado y que se encontraban, en su mayoría, en estado adulto. Sin embargo, incluso sometiendo a la vegetación de la parcela a presiones de pastoreo muy altas, se esperaría un aumento de cobertura en las copas de árboles de talla baja (de dos a cinco metros), debido a la alta defoliación que hubieran sufrido en sus ramas bajas, lo que provocaría una reposición foliar a corto plazo por parte del árbol para suplir la carencia de superficie fotosintética.

6.3 Precipitación

En el Cuadro A7 del Apéndice y en la Figura 18, se presentan los datos de la precipitación pluvial (mm) diaria y por mes respectivamente, durante el año 2002, en el área de estudio. Se observa una época de mayor precipitación pluvial muy marcada (época de lluvias), que abarca cuatro meses aproximadamente, es decir, de la segunda quincena de junio a la primera quincena de octubre, intervalo de tiempo en el que se presentó más del 78 % de la precipitación pluvial anual (más de 990 mm de los 1265 mm de lluvia en ese año). Estos datos son similares a lo reportado para la zona, en otros años por CEIEPASP, 2003; Bernal, 1999 y COTECOCA, 1998. Así mismo, en la Figura 19, se presenta por día, la precipitación pluvial ocurrida el día anterior a cada una de las fechas en las que se captaron escurrimientos. Dado lo marcado de la concentración de

gran parte de la precipitación pluvial en un corto periodo de tiempo, es que se consideró que sería probable encontrar aumentos muy marcados en las tasas de escurrimiento superficial del agua de lluvia.

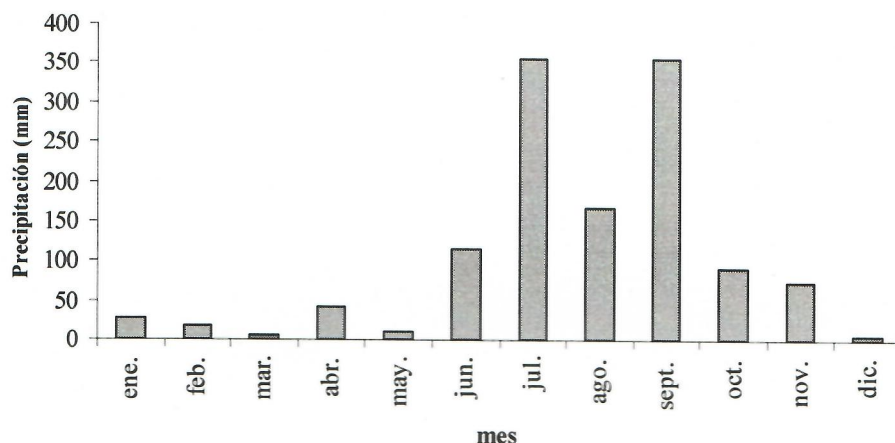


Figura 18. Precipitación pluvial (mm) por mes, durante el año de 2002, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

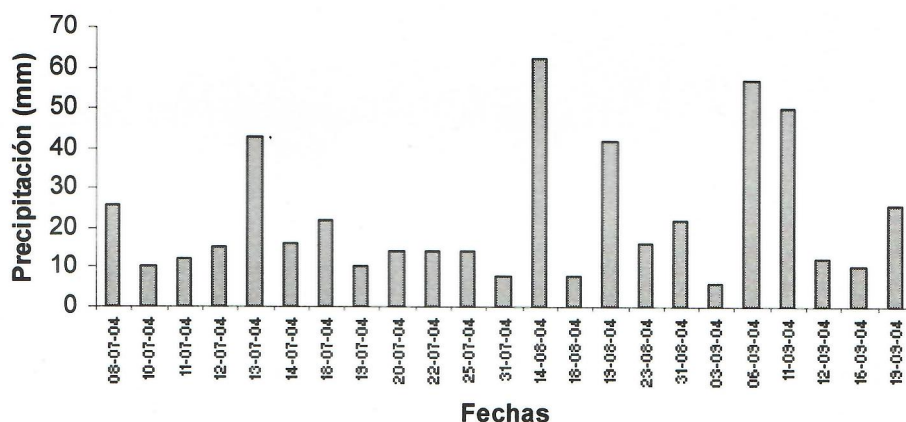


Figura 19. Precipitación pluvial (mm) registrada un día antes de cada una de las fechas en las que se presentaron escurrimientos superficiales de agua de lluvia, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

6.4 Esguerrimiento superficial

En el Cuadro A8 del Apéndice, se presentan los datos del esguerrimiento superficial captado por tratamiento. Sólo se presentaron esguerrimientos superficiales en 23 de 71 eventos de lluvia, en donde los esguerrimientos captados, no tuvieron diferencias importantes entre tratamientos, excepto en tres ocasiones en donde el esguerrimiento superficial captado del tratamiento dos, se disparó, alcanzando niveles del doble o del triple de lo esguerrido en los otros tratamientos en la misma fecha (Figura 20).

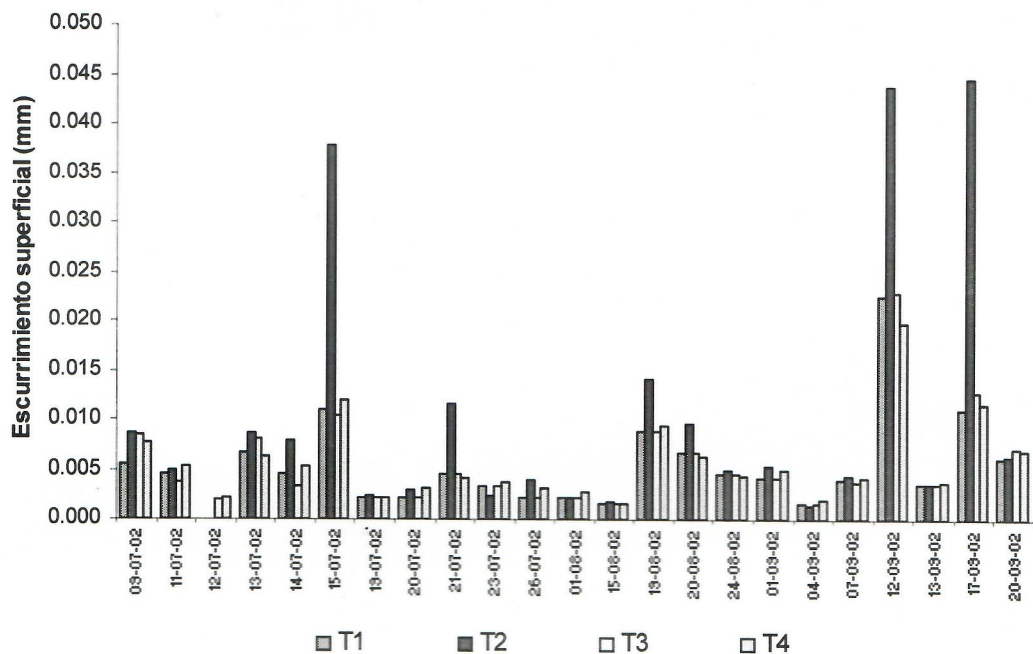


Figura 20. Esguerrimiento superficial de agua captado, por fecha, y por tratamiento, durante el año 2002, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

Esa diferencia entre esguerrimientos, posiblemente tenga su origen en la diferencia en las coberturas arbóreas entre tratamientos, ya que en el tratamiento dos, fue donde se encontró el dosel más abierto, con valores que fueron de 62.6 a 64.4 %, lo que influyó en

la menor capacidad de retención de agua de lluvia por hojas y ramas de los árboles. Esta condición ayuda a explicar el hecho de que salió más escurrimiento superficial en este tratamiento que en los otros tres (Figura 21).

El agua llovida, fue retenida en algún porcentaje (no determinado en esta investigación) por el dosel arbóreo, y mientras más espeso es el mismo, más agua es captada por sus estructuras (ramas, hojas, frutos) y liberada lentamente en forma de gotas, escurrimiento o vapor.

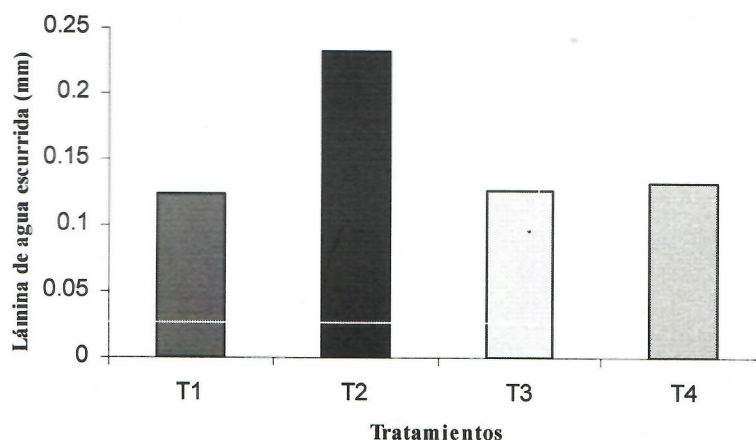


Figura 21. Escurrimiento anual acumulado, por tratamiento, durante el 2002, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

Dado que la cobertura del suelo por mantillo fue elevada en los cuatro tratamientos (superior al 80 %), no existió el efecto negativo de las gotas de agua de mayor tamaño que se forman en las hojas de los árboles y que caen al suelo, y que en terrenos en los que se carece de estratos vegetales intermedios y mantillo, llegan a provocar incluso mayor erosión que la que ocasionarían las gotas de lluvia al golpear directamente el suelo al no haber cobertura del mismo (Becerra, 1999; Savory 1990).

Una relación lógica esperada era entre el escurrimiento y la precipitación; sin embargo en el sistema silvopastoril estudiado, el coeficiente de determinación más alto en el modelo de regresión lineal simple para esta relación fue de $R^2 = 0.05$. En cuanto a los coeficientes de escurrimiento, que expresan la proporción de lluvia escurrida, estos fueron de 0.028, 0.063, 0.031 y 0.035 % para los tratamientos T3, T2, T1 y T4 respectivamente, con un promedio de 0.041 % para los tratamientos pastoreados (Cuadro A8 de Anexos).

Una de las funciones del mantillo, es servir como reservorio o almacén de una parte importante del agua de lluvia. Como se muestra en el Cuadro 2, la cantidad de agua promedio almacenada, encontrada en cada uno de los tratamientos, es superior al escurrimiento anual captado en cada tratamiento, y el porcentaje de humedad que se almacenó en el mantillo llegó a ser incluso superior al 65 % del peso seco del mantillo.

El porcentaje de agua encontrado en el muestreo realizado “una semana antes del pastoreo”, en el tratamiento tres, fue la más alta de todos los muestreos (65.7 %), encontrándose láminas de agua que fueron de 3.37 mm en el tratamiento cuatro a 4.12 mm en el tratamiento uno, lo que explica junto con las altas tasas de infiltración de agua en el suelo, el porqué en algunos eventos de lluvia no se captó escurrimiento.

Cuadro 2. Porcentaje de humedad del mantillo antes y después del pastoreo, por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

MUESTREO	T1	T2	T3	T4
Una semana antes (%)	54	62.5	65.7	63
Una semana después (%)	59	56.7	42.1	52.2
Tres meses después (%)	40.2	28.5	35.7	30
TOTAL (kg de agua/ha)	123 813.6	109 653.3	114 066.67	101 293.27
LÁMINA DE AGUA (mm)	4.12	3.65	3.8	3.37

Tratamientos con carga animal instantánea alta (T1), media (T2), baja (T3) y nula (T4).

6.5 Pérdida de suelo

Como se observa en el Cuadro A9 del Apéndice y en la Figura 22, sólo en el tratamiento dos se presentaron relativamente mayores cantidades de pérdida de suelo, lo que está relacionado con el escurrimiento encontrado para el mismo tratamiento. Sin embargo, no existió una relación entre los escurrimientos captados y las precipitaciones observadas el día anterior a la fecha en la que se tomó cada muestra de sedimento, ya que ninguna ecuación de regresión tanto lineal como logarítmica mostró valores de R^2 mayores a 0.2.

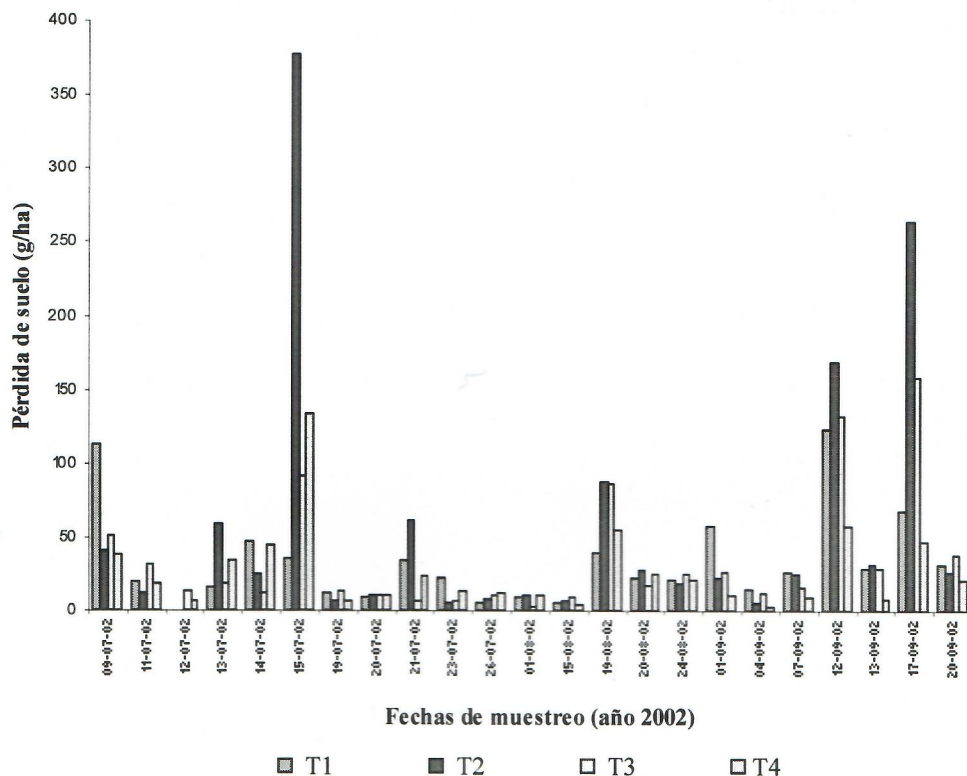


Figura 22. Pérdida de suelo captada por fecha, por tratamiento, durante el año 2002, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

La regresión lineal simple entre pérdida de suelo y escurrimiento, indica claramente una estrecha vinculación entre estas variables y muestra una relación directamente proporcional entre ellas con una $R^2 = 0.87$ (Figura 23).

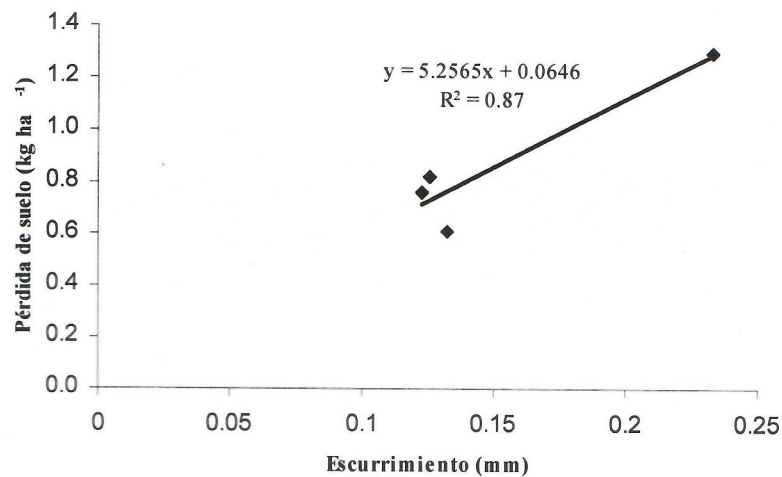


Figura 23. Relación entre la pérdida de suelo y el escurrimiento, en un sistema silvopastoril bajo bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México. Año 2002.

Como se observa en la Figura 24, las pérdidas de suelo acumuladas por ha por año, en cada uno de los cuatro tratamientos, fueron extremadamente bajas, con pérdidas de suelo menores a $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, excepto en T2, en donde la pérdida acumulada fue de $1.299 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Estas pérdidas de suelo son bastante inferiores a la tasa máxima tolerable de $6.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ señalada por McCormack *et al.* (1982) para un suelo renovable de 1.0 m de profundidad como el estudiado aquí.

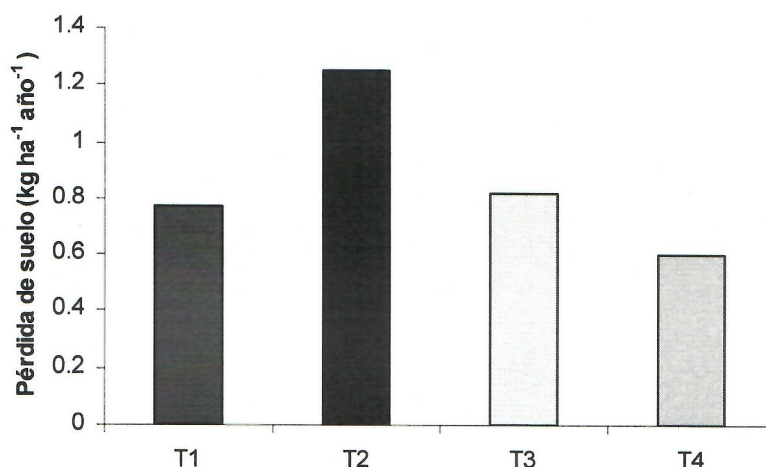


Figura 24. Pérdida de suelo acumulada por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

En concordancia con lo reportado por Valdéz (2003); Hernández-San Román (2001) y Evans (1994), y coincidiendo con el efecto esperado de la pendiente del terreno sobre la pérdida de suelo, la Figura 25 muestra una relación directamente proporcional, en la que a mayor pendiente del terreno, existe una mayor pérdida de suelo, con un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.98$) sumamente alto.

Ya que las pendientes en los cuatro tratamientos fueron muy pronunciadas, queda por explicar las posibles razones por las que el escurrimiento superficial, y sobre todo, las pérdidas de suelo fueron tan bajas. Esto debe explicarse por la suma de varios factores que en conjunto pueden potencializar su efecto (acción sinérgica), y que son, a saber, las coberturas arbórea, arbustiva, herbácea, de mantillo, las tasas de infiltración, entre los más importantes.

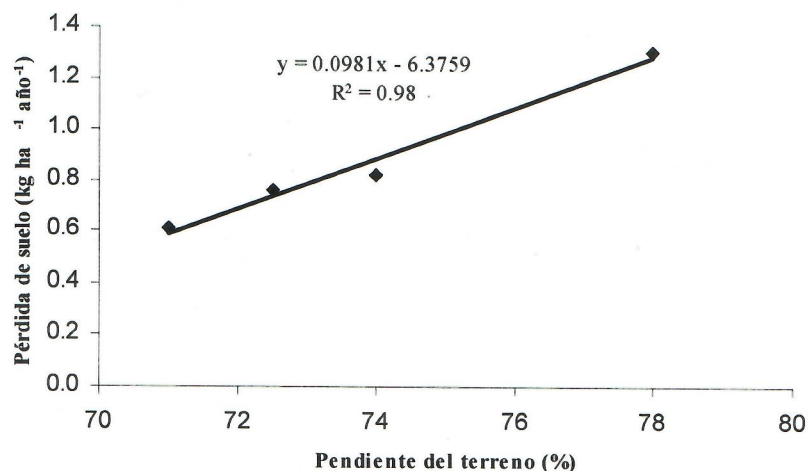


Figura 25. Relación entre la pérdida de suelo y la pendiente, en un sistema silvopastoril bajo bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México. Año 2002.

En el Cuadro 3, se presentan las ecuaciones de predicción y los valores de R^2 entre las diferentes coberturas del suelo y la pérdida de suelo, encontrándose que los coeficientes de determinación tanto para cobertura arbórea y cobertura herbácea, en ningún caso fueron valores altos que por sí solos explicaran un efecto decisivo en la reducción de las tasas de pérdida de suelo, ya que el valor más alto para R^2 fue de 0.29.

Sin embargo, los coeficientes de determinación para la regresión entre pérdida de suelo y porcentaje de cobertura arbustiva y por mantillo, fueron bastante más congruentes y altos, llegando incluso a $R^2 = 0.55$ (Figura 26). Es importante recalcar, entonces que, el efecto reductor de las tasas de erosión, se presenta como resultado del efecto conjunto de la cobertura arbustiva y de mantillo.

Cuadro 3. Coeficientes de determinación (R^2) y ecuación de regresión entre pérdida de suelo y cobertura, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

Estrato arbóreo	Modelo	R^2	Ecuaciones de predicción
Antes del pastoreo	Logarítmico	0.2899	$y = -0.0097x + 1.653$
	Exponencial	0.1973	$Y = 1.6748e^{-0.0086x}$
Después del pastoreo	Log.	0.284	$Y = -0.0096x + 1.6492$
	Exp.	0.1973	$Y = 1.6748e^{-0.0086x}$
3 meses después del pastoreo	Log.	0.2509	$Y = -0.0087x + 1.5917$
	Exp.	0.1644	$Y = 1.5615e^{-0.0076x}$
Cobertura promedio	Log.	0.2761	$Y = -0.0094x + 1.6355$
	Exp.	0.1886	$Y = 1.6451e^{-0.0083x}$
Estrato arbustivo	Cob. aérea		
Antes del pastoreo	Log.	0.1226	$Y = -0.0044x + 1.0814$
	Exp.	0.1023	$Y = 1.0265e^{-0.0043x}$
Después del pastoreo	Log.	0.2839	$Y = -0.0095x + 1.2875$
	Exp.	0.2945	$Y = 1.3174e^{-0.0104x}$
3 meses después del pastoreo	Log.	0.2124	$Y = -0.007x + 1.2054$
	Exp.	0.2106	$Y = 1.1944e^{-0.0075x}$
Cobertura promedio	Log.	0.1974	$Y = -0.0067x + 1.1836$
	Exp.	0.1885	$Y = 1.1596e^{-0.007x}$
Estrato arbustivo	Cob. basal		
Antes del pastoreo	Log.	0.0227	$Y = -0.0045x + 1.1824$
	Exp.	0.0406	$Y = 0.052\ln(x) + 0.5595$
Después del pastoreo	Log.	0.0421	$Y = -0.1201x + 0.6892$
	Exp.	0.0962	$Y = -0.1692\ln(x) + 0.554$
3 meses después del pastoreo	Log.	0.0205	$Y = -0.0808x + 0.6601$
	Exp.	0.0624	$Y = -0.1313\ln(x) + 0.5659$
Cobertura promedio	Log.	0.0072	$Y = -0.0393x + 0.6091$
	Exp.	0.0406	$Y = 0.052\ln(x) + 0.5595$
Estrato herbáceo	Cob. aérea		
Antes del pastoreo	Log.	0.1117	$Y = 0.1388x + 0.7242$
	Exp.	0.0547	$Y = 0.7475e^{0.1043x}$
Después del pastoreo	Log.	0.1937	$Y = -0.1571x + 1.0148$
	Exp.	0.2841	$Y = 1.008e^{-0.2041x}$
3 meses después del pastoreo	Log.	0.1504	$Y = -0.1362x + 1.0034$
	Exp.	0.2337	$Y = 0.9984e^{-0.1823x}$
Cobertura promedio	Log.	0.0411	$Y = -0.0804 + 0.947$
	Exp.	0.093	$Y = 0.9465e^{-0.1298x}$

Cuadro 3. Continuación...

Estrato herbáceo	Cob. basal		
Antes del pastoreo	Log.	0.0201	$Y = -0.0028x + 0.9553$
	Exp.	0.0595	$Y = 0.9791e^{-0.0052x}$
Después del pastoreo	Log.	0.0878	$Y = -0.0036x + 0.9824$
	Exp.	0.1587	$Y = 0.9825e^{-0.0052x}$
3 meses después del pastoreo	Log.	0.096	$Y = -0.0039x + 0.994$
	Exp.	0.096	$Y = -0.0039x + 0.994$
Cobertura promedio	Log.	0.096	$Y = -0.0039x + 0.994$
	Exp.	0.1375	$Y = 0.998e^{-0.0057x}$
Mantillo			
Antes del pastoreo	Log.	0.059	$Y = -0.0133x + 2.1149$
	Exp.	0.0721	$Y = 3.6532e^{-0.0158x}$
Después del pastoreo	Log.	0.2554	$Y = -0.0154x + 2.1924$
	Exp.	0.3206	$Y = 4.0946e^{-0.0186x}$
3 meses después del pastoreo	Log.	0.4516	$Y = -0.0384x + 4.3636$
	Exp.	0.5542	$Y = 53.138e^{-0.0456x}$
Cobertura promedio	Log.	0.4414	$Y = -0.0404x + 4.5151$
	Exp.	0.5476	$Y = 65.129e^{-0.0483x}$

Es importante señalar que con respecto a cobertura herbácea tanto basal como aérea, se observaron R^2 demasiado bajos, contrario a lo observado para el estrato arbóreo, arbustivo y mantillo,

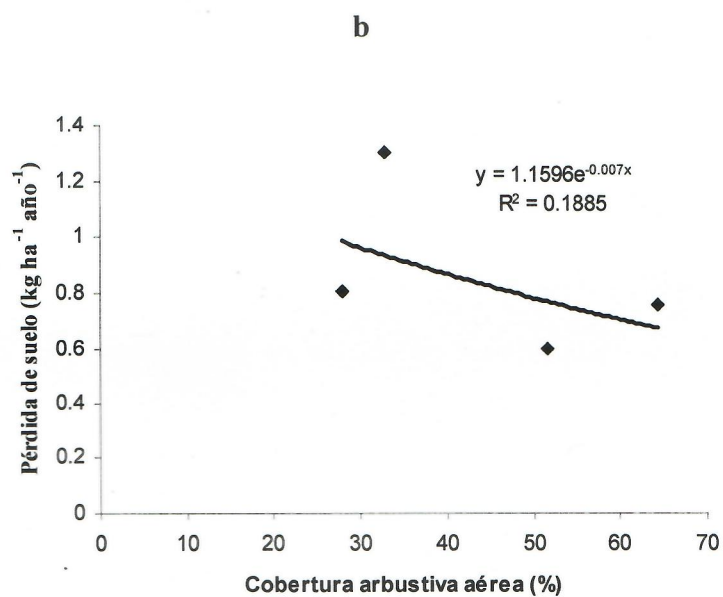
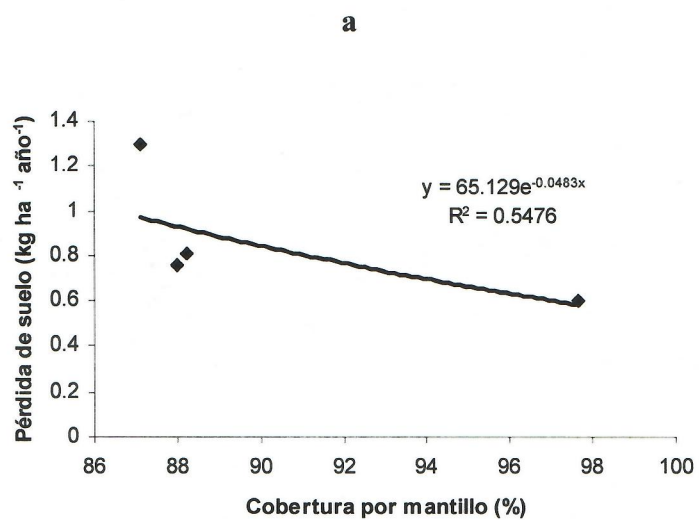


Figura 26. Efecto de la cobertura por mantillo (a) y por arbustivas (b), sobre la pérdida de suelo en un sistema silvopastoril bajo bosque de encino, en Chapa de Mota, estado de México.

6.6 Tasas de infiltración

Las velocidades de infiltración en todos los tratamientos (T1, T2, T3 y T4), tanto una semana antes del pastoreo, una semana después del mismo, y tres meses después del pastoreo (Figura 27), se comportaron como moderadamente altas a altas, llegando a velocidades de infiltración incluso de 140 cm/h.

Lo anterior, pone de manifiesto que el suelo de las parcelas tiene una alta capacidad de filtración del agua de lluvia, lo que junto con su profundidad (un metro en promedio) y la menor intensidad de los eventos de lluvia (comparada con la intensidad que presentan las lluvias tropicales), reducen de manera significativa la posibilidad de que se presenten saturaciones en su espacio poroso y consecuentes escurrimientos superficiales. Esto explica el hecho de que se hayan captado escurrimientos de tan baja magnitud.

El comportamiento decreciente de la infiltración en estos suelos en el tiempo, se observó en los cuatro tratamientos, en las pruebas de infiltración realizadas una semana antes, una semana después y tres meses después del pastoreo, como se reporta en la literatura para un suelo con una textura, estructura y uniformidad de los estratos dentro del perfil similares al suelo de las parcelas de escurrimiento.

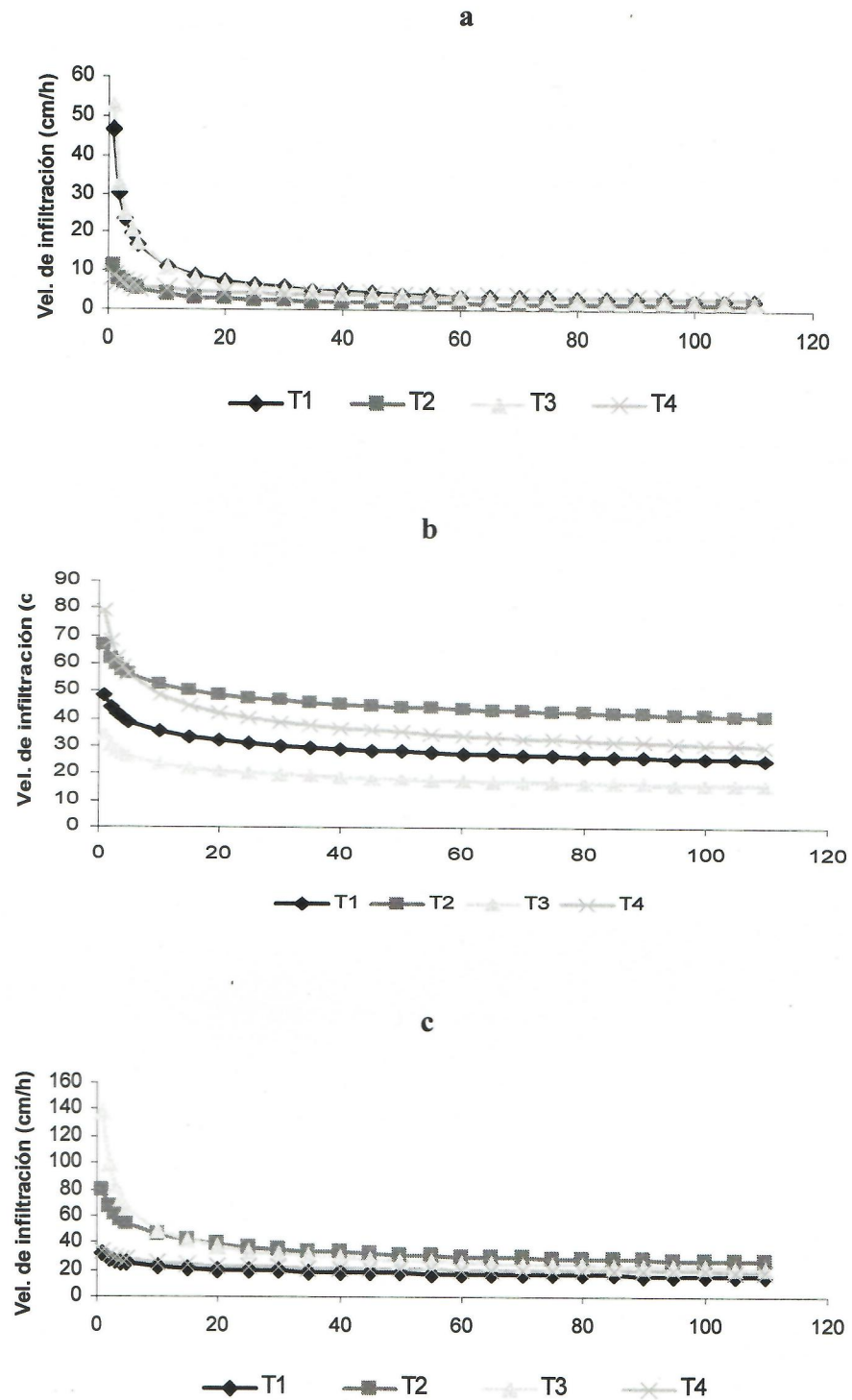


Figura 27. Velocidad de infiltración, una semana antes (a), una semana después (b) y tres meses después del pastoreo (c), por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

La velocidad de infiltración en cada uno de los cuatro tratamientos (Figuras 28-31), se comportó de manera similar, mostrándose una mayor capacidad de absorción de agua por parte del suelo en los muestreos realizados una semana después del pastoreo y tres meses después del pastoreo comparado con la velocidad de infiltración observada en el primer muestreo (una semana antes del pastoreo), concordando los resultados de las tres parcelas en las que hubo pastoreo con los resultados encontrados en la parcela testigo (sin pastoreo). El pastoreo no afectó de manera clara la velocidad de infiltración del agua en el suelo de las parcelas.

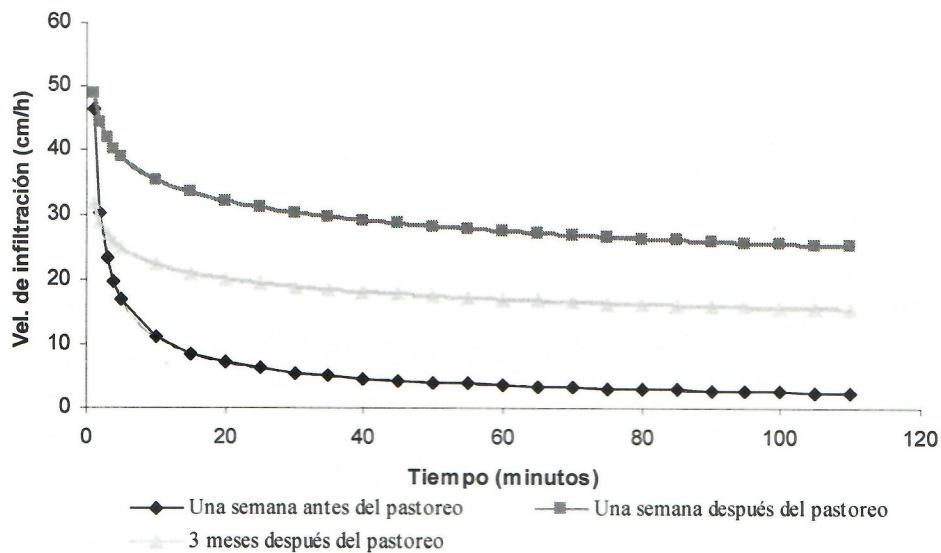


Figura 28. Velocidad de infiltración en el suelo del tratamiento uno (T1), en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

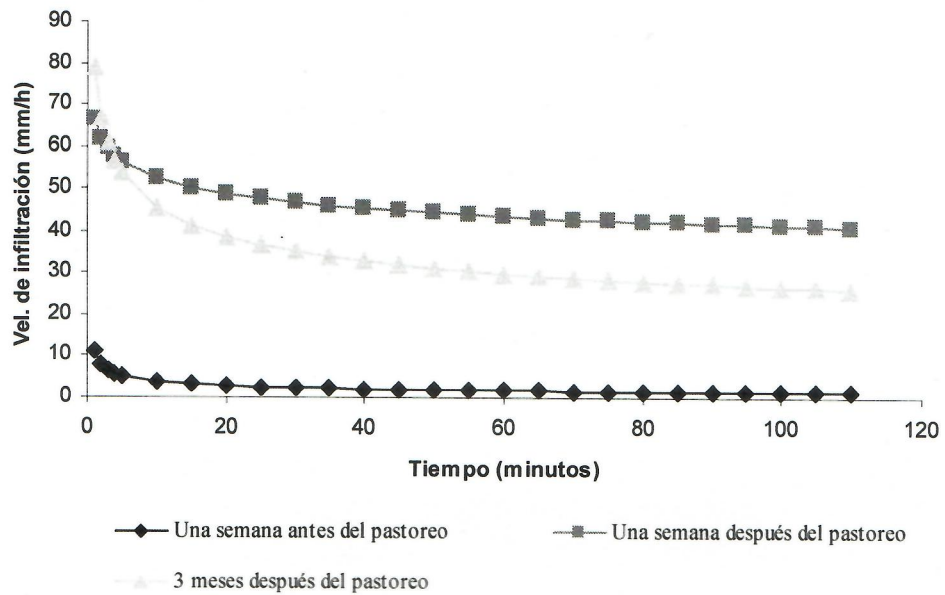


Figura 29. Velocidad de infiltración en el suelo del tratamiento dos (T2), en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

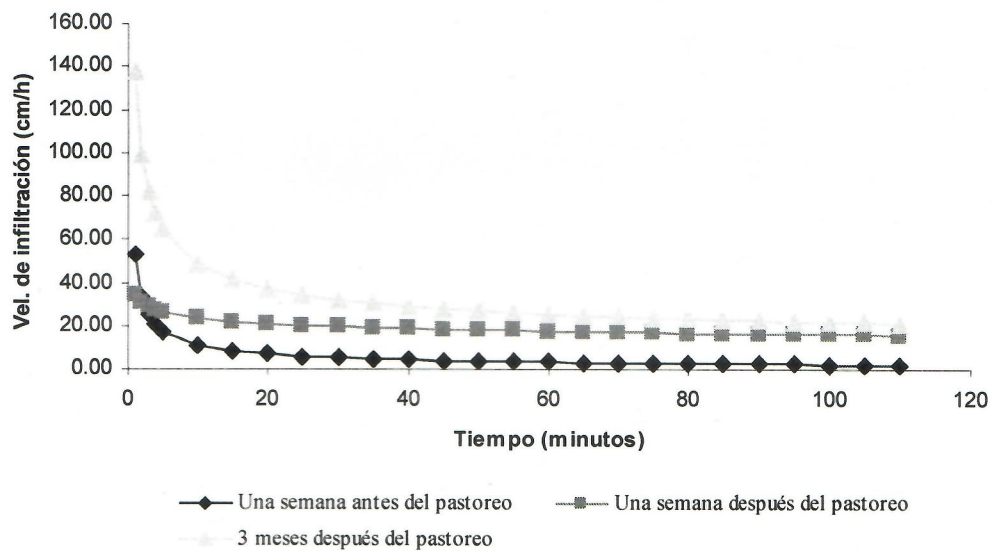


Figura 30. Velocidad de infiltración en el suelo del tratamiento tres (T3), en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

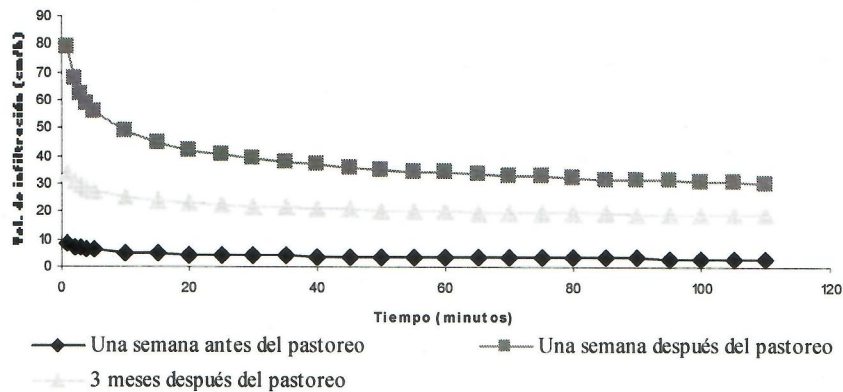


Figura 31. Velocidad de infiltración en el suelo del tratamiento cuatro (T4), en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

En el Cuadro 4 se presenta la infiltración básica, la pérdida de suelo y el escurrimiento por año obtenidos. En la relación infiltración básica promedio y pérdida de suelo, ningún modelo de regresión probado mostró un valor adecuado del coeficiente de determinación, ya que ninguno tuvo una R^2 mayor a 0.06, lo que indica que la pérdida de suelo en el escurrimiento superficial, no estuvo influenciado por la infiltración básica, sino por otros factores que al relacionarlos explican mejor el fenómeno erosivo.

Cuadro 4. Infiltración básica (I b), pérdida de suelo (P S) y escurrimiento total en cada uno de los tratamientos, en Chapa de Mota, Estado de México.

Tratamiento	I b (cm/h)	P S (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Escurrimiento (mm año ⁻¹)
T1	50.87	0.76	0.123
T2	52.1	1.299	0.233
T3	74.99	0.818	0.126
T4	56.76	0.608	0.132

Tratamientos con carga animal instantánea alta (T1), media (T2), baja (T3) y nula (T4).

6.7 Pérdida de nutrientes (NO_3^- y K) en el escurrimiento superficial

Los valores de pérdida de NO_3^- y K, por tratamiento, se presentan en el Cuadro 5. El coeficiente de determinación para la relación entre pérdida de nutrientes (NO_3^- y K) y la lámina escurrida, usando el modelo lineal (Figura 32), mostró valores de alta significancia para los dos nutrientes, ya que se obtuvo para NO_3^- una $R^2 = 0.92$ y para K una $R^2 = 0.90$, para el análisis de pérdida de nutrientes antes del pastoreo, y los valores encontrados en el análisis realizado después del pastoreo, fueron valores ligeramente menos significativos (Figura 33), ya que para NO_3^- se encontró una $R^2 = 0.70$ y para K una $R^2 = 0.72$. Lo anterior, permite aseverar en orden de significancia, que a mayor escurrimiento, se espera mayor pérdida de estos nutrientes. Así mismo, puede inferirse que el pastoreo tuvo algún efecto sobre el suelo, el cual es difícil de determinar, que provocó que el escurrimiento acarreará ligeramente menos nutrientes.

Cuadro 5. Escurrimiento medio anual, pérdida de NO_3^- y de K por tratamiento, antes y después del pastoreo, en Chapa de Mota, Estado de México.

No. de Tratamiento	Escurrimiento anual (L/ha)	Pérdida de NO_3^- (kg/ha/año)	Pérdida de K (kg/ha/año)
ANTES DEL PASTOREO			
T1	1 227	1.3	4.078
T2	2 334	2.12	5.113
T3	1 263	1.33	3.727
T4	1 317	1.59	3.71
DESPUÉS DEL PASTOREO			
T1	1227	1.21	1.552
T2	2 334	2.12	3.673
T3	1263	1.51	1.497
T4	1317	1.78	2.81

Tratamientos con carga animal instantánea alta (T1), media (T2), baja (T3) y nula (T4).

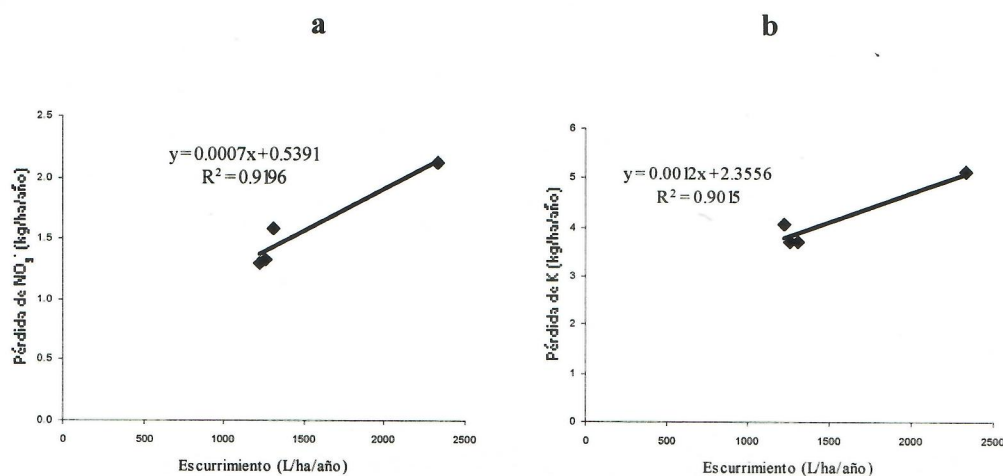


Figura 32. Relación entre el escurrimiento de agua anual y la pérdida de NO_3^- (a) y la pérdida de K (b), antes del pastoreo, en un bosque de encino, en Chapala de Mota, Estado de México.

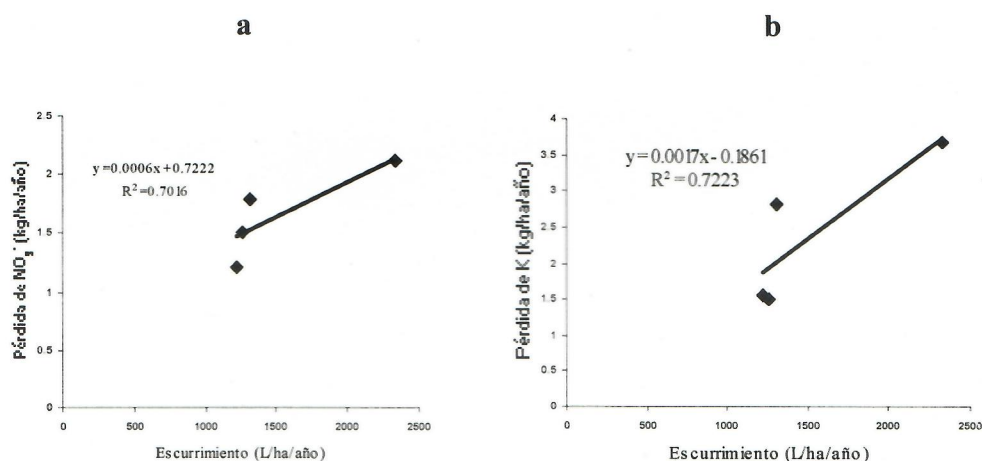


Figura 33. Relación entre el escurrimiento de agua anual y la pérdida de NO_3^- (a) y la pérdida de K (b), después del pastoreo, en un bosque de encino, en Chapala de Mota, Estado de México.

6.8 Resistencia a la penetración

En ningún tratamiento, a profundidades de cero y diez centímetros se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la resistencia del suelo a la penetración ni antes ni después del pastoreo (Cuadro A10 del Apéndice), por lo que no representó un factor que explicara contundentemente o que tuviera relación clara con la pérdida de suelo y con las tasas de escurrimiento del agua de lluvia (Figuras 34 a 36).

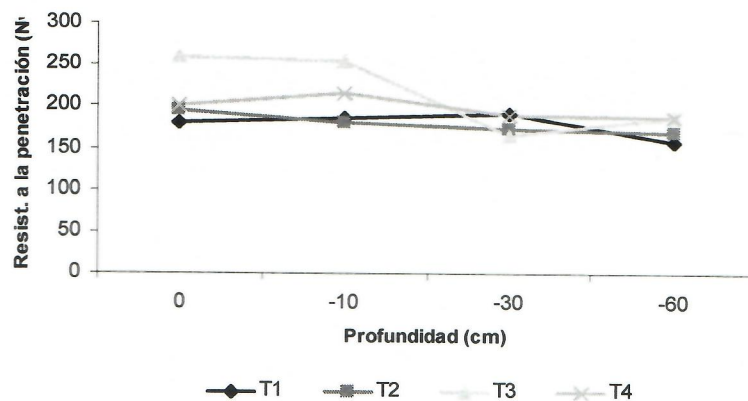


Figura 34. Resistencia del suelo a la penetración, una semana antes del pastoreo, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

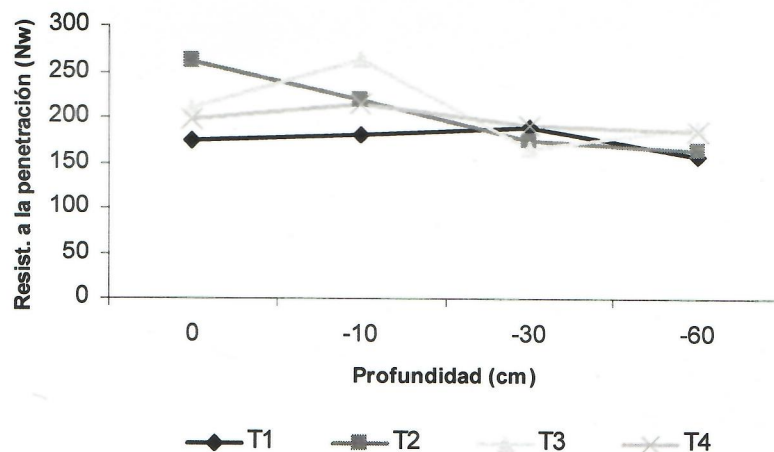


Figura 35. Resistencia del suelo a la penetración, una semana después del pastoreo, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

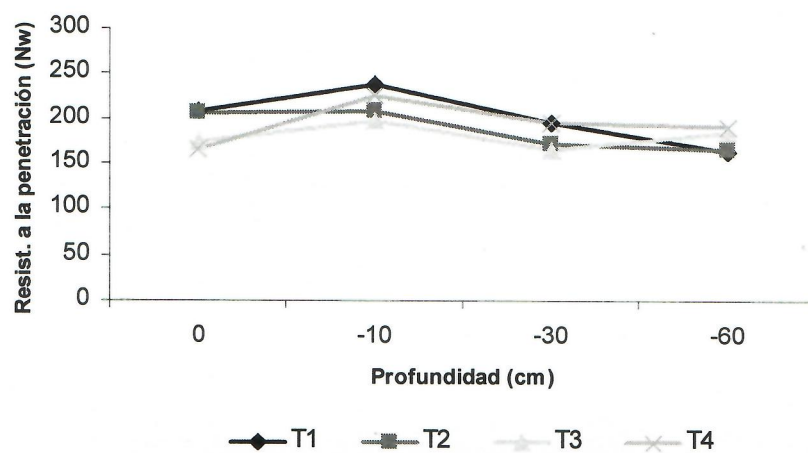


Figura 36. Resistencia del suelo a la penetración, tres meses después del pastoreo, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

7 CONCLUSIONES

Relacionado con los objetivos e hipótesis planteadas en este trabajo de investigación, realizado en un bosque pastoreado con una manada compuesta por bovinos, ovinos, caprinos, porcinos y equinos, en Chapa de Mota, Estado de México, de julio a diciembre del año 2002, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Las pérdidas de suelo observadas en el bosque de encino pastoreado con un hato mixto, oscilaron de 0.76 a 1.30 kg ha⁻¹ año⁻¹, bastante inferiores a la tasa máxima tolerable de 6.5 t ha⁻¹ año⁻¹ señalada para un suelo de 1.0 m de profundidad.
2. Los tratamientos con cargas animal instantáneas de 1 067.9, 519.07 y 347.25 U.A./ha, mostraron un escurrimiento superficial promedio anual de 0.161 mm y un coeficiente de escurrimiento promedio anual de 0.161 mm y un coeficiente de escurrimiento promedio de 0.041%, una pérdida de suelo promedio de 0.959 kg ha⁻¹ año⁻¹, y una pérdida promedio de nitratos de 1.59 kg ha⁻¹ año⁻¹ y de potasio de 3.27 kg ha⁻¹ año⁻¹, relativamente iguales a lo observado en el tratamiento sin pastoreo.
3. La pérdida de suelo fue explicada individualmente por las variables: grado de pendiente del terreno ($R^2 = 0.98$), escurrimiento superficial ($R^2 = 0.87$), cobertura por mantillo ($R^2 = 0.55$) y arbustiva ($R^2 = 0.18$), mientras que las variables: precipitación, cobertura arbórea y herbácea,

infiltración básica y resistencia al penetrómetro no influyeron de manera importante.

4. La pérdida de nitratos y de potasio fue explicada por el escurrimiento superficial antes ($R^2 = 0.92$ y $R^2 = 0.90$, respectivamente) y después del pastoreo ($R^2 = 0.70$ y $R^2 = 0.72$).
5. El bosque de encino puede utilizarse para el apacentamiento de manadas mixtas compuestas por bovinos, ovinos, caprinos, porcinos y equinos, con cargas animal altas y frecuencias de pastoreo de una vez por año y por sitio de asignación de pastoreo, sin aumentar las tasas de escurrimiento superficial, y pérdida de suelo y nutrimentos (nitrógeno y potasio) más allá de una tasa máxima tolerable.

8 LITERATURA CITADA

Astier-Calderón, M.; Maass-Moreno, M.; Etchevers-Barra, J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*. (36): 605-620. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Baca A., E. G.; García G., E. 1999. Monografía municipal de Chapa de Mota, Estado de México. Instituto Mexiquense de Cultura. Toluca, Estado de México. 96 p.

Becerra A., M. 1999. Escorrentía, erosión y conservación de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 376 p.

Bernal B., C. 1989. Variación de la velocidad de infiltración como función del tirante H y condición inicial de Humedad (01) para el modelo empírico de Kostiakov-Lewis. Tesis (Ing. Agr. Esp. En Zonas Áridas). UACH. Bermejillo, Dgo. pp.1-45.

Bernal F., A. 1999. Evaluación de pastos y arbustos en un bosque de Encino, bajo un pastoreo rotacional en franjas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Ingeniería Agrícola, UNAM. Cuautitlán Izcalli, Estado de México. 76 p.

Bingham, S. and Savory, A. 1990. Holistic Resource Management. Workbook. Island Press. EUA. pp: 100, 173.

Blackburn, W. H. 1984. Impacts of grazing intensity and specialized grazing systems on watershed characteristics and responses. En: Developing strategies for rangeland

management. National Research Council/National Academy of Sciences. West – view Press. Boulder, CO., EUA. pp: 927 – 983.

Blackburn, W. H.; Knight, R. W.; Wood, M. K. 1982. Impact of grazing on watersheds: a state of knowledge. Texas Agr. Exp. Sta. Pub. 1982: MP-1496. Texas, EUA. pp: 50-72.

Brown, J. H.; McDonald, W. 1995. Livestock Grazing and Conservation on Southwestern Rangelands. *Conservation Biology*. 9 (6):1644 – 1647.

Castillo Q., R. 1986. Evaluación de la calidad nutritiva de la dieta de cabras en pastoreo en la región central del estado de Chihuahua. Tesis de Maestría. Facultad de Zootecnia, División de Estudios de Postgrado. Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México. 125 p.

CEIEPASP. 2003. Informe de actividades 2002 y programa de trabajo 2003. Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agrosilvopastoril (CEIEPASP), FMVZ-UNAM. Chapa de Mota, Estado de México. 145 p.

Challenger, A. 1998. Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México. Ed. Redacta. México, D.F. 847 p.

Colman, E. A. 1953. *Vegetation and Watershed Management*. The Ronald Press. New York, U.S.A. pp. 280-286.

Contesse, G. D. 1990. El desarrollo forestal chileno. Una realidad sustentable. Ed. SEREPSERVI. Santiago de Chile, Chile. 144 p.

Cook, B. G.; Garthe R. J.; Grimes, R. F. 1984. Tropical pastures in eucalypt forest near Gympie. Queensland Agricultural Journal (110): 45-46. Australia.

COTECOCA. 1998. Evaluación de la condición actual de los agostaderos del Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agrosilvopastoril (CEIEPASP), ubicado en el municipio de Chapa de Mota, Estado de México. COTECOCA-SAGAR. México. 46 p.

Delorit, R. J.; Ahlgren, H. L. 1983. Producción agrícola. CECSA, séptima edición. México. 190 p.

Dvorak, J.; Novak, L. 1994. Soil conservation and silviculture. ELSERVIER. Amsterdam, Holanda. 339 p.

Etchevers-Barra, J.; Fischer, I.; Vidal, K. D.; Sandoval, M. A.; Oleschko, K.; Román, S. 2000. Labranza de conservación, índices de calidad del suelo y captura de carbono. En: Memorias del Simposio Internacional de Labranza de Conservación. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agrícolas y Pecuarias-Produce. Mazatlán, Sinaloa, México. 12 p.

Elliot, W. J.; Foster, G. R.; Elliot, A. V. 1991. Soil Erosion: Processes, Impacts and Prediction. En: Soil Management for Sustainability. Editado por Lal, R. y Pierce F. J. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, Iowa, EUA. pp.46-58.

El-Swaify, S. A.; Dangler, E. W. 1982. Rainfall erosion in the tropics: a state of the art. In: Kussow, W. (ed.). Soil erosion and conservation in the tropics. ASA. Special Publ. No. 43:1-26.

Elwell, H. A., and M. A. Stocking, 1976. Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhodesia. *Geoderma*. (15):61-70.

Enkerlin E., C.; Cano G.; Garza R. A.; Vogel E. 1997. *Ciencia Ambiental y Desarrollo Sostenible*. International Thomson Editors. México. 690 p.

Evans, R. 1994. Mecanismos de la erosión hídrica y sus controles espaciales y temporales: un punto de vista empírico. En: Kirkby, M. J. y Morgan, R. P. 1994. *Erosión de suelos*. LIMUSA. México. 375 p.

FAO. 1953. *El pastoreo y los montes*. Food, Agriculture, ONU. Roma, Italia. 45 p.

Fierros G., A. 1990. Factores del ambiente que afectan a la regeneración natural de las coníferas y su manipulación silvícola. *Memorias de la tercera reunión anual del Centro de Investigaciones Forestales y Agropecuarias del estado de Veracruz (Resultados y avances de investigación)*. INIFAP, SARH. México. 280 p.

Figueroa B., S. 1975. Pérdidas de suelo y nutrientes y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Tezcoco. Tesis de M. en C. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 209 p.

Figueroa B., S.; Amante O.; Cortés H., G.; Pimentel L., J.; Osuna E., S.; Rodríguez J., M.; Morales F., J. 1991. *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. SARH-CP. Centro Regional para Estudios de Zonas Áridas y Semiáridas. México. pp. 72-150.

Fleischner, T. L. 1994. Ecological Costs of Livestock Grazing in Western North America. *Conservation Biology*. 8 (3):629 – 644.

García, E. 1988. Modificaciones al Sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. 4ª ed. UNAM. México. 217 p.

Giasson, E. 2001. Los principales factores ambientales y de suelos que influyen sobre su productividad y sobre su manejo. FAO. Revisado en: http://www.fao.org/ag/ags/AGSE/agse_s/7mo/iita/C2.htm. Consultada en octubre del 2002.

Gifford, G. F.; Hawkins, R. H. 1978. Hydrologic impact of grazing on infiltration: a critical review. *Water Resources*. (14): 305-313.

Glenn, O. S.; Fangmeier, D. D.; William, J. E.; Frevert, R. K. 1993. Soil and water conservation engineering. 4 ed. EUA. pp.18-25.

Gold, M. A.; Hanover, J. W. 1987. Agroforestry systems for the temperate zone. *Agroforestry Systems*. Martinus Nijhoff Publishers. Holanda. (5):109-121.

Gollany, H. T.; Schumacher, T.E.; Evenson, P. D.; Lindstorm M. J.; Lemme G. D. 1991. Aggregate stability of an eroded and desurfaced Typic Argiustoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (55):811-816.

Hernández-San Román, M. E. 2001. Erosión y conservación de suelos en sistemas agroforestales de café (*Coffea* spp.) en la Huasteca alta de Veracruz. Tesis de M. en C. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 153 p.

Hodgson, J. 1994. Grazing management science into practice. Longman Scientific & Technical. N.Y., EUA. 203 p.

- Holecheck, J. L.; Pieper, R. D.; Herbel, C. H. 1989. Range Management, principles and practices. Prentice-Hall Inc. New Jersey, EUA. 112 p.
- Hudson, N. 1977. Soil Conservation. BT Batsford Limited. Londres, Inglaterra. pp. 32-63.
- INEGI. 1991. Superficie forestal de México. Producción forestal de México. INEGI, Colegio de Posgraduados, FAO. México, D.F. pp.3-23.
- Isaacson, K. 1998. Silvopasture: Trees and Pastures. Inside Agroforestry. USDA. Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Natural resources Conservation Service. National Agroforestry Center. East Campus-UNL. Lincoln, Nebraska. EUA. 7p.
- Jaindl, R. G.; Sharrow, S. H. 1988. Oak/Douglas-fir/sheep: a Three-crop silvopastoral system. Agroforestry Systems. Kluwer Academic Publishers. Holanda. (6):147-152.
- Jiménez M., A.; Martínez, H. P. 1985. Utilización de praderas. Universidad Autónoma Chapingo, México. 143 p.
- Klock, G. O. 1982. Some soil erosion effects on forest soil productivity. Determinants of soil loss tolerance. ASA. pp. 53-66.
- Kosco, B. H.; Bartolome J. W. 1981. Forest Grazing: Past and Future. Viewpoint. Journal of Range Management. 34 (3):248-251.
- Lal, R. 1979. Analysis of factors affecting rainfall erosivity and soil erodability: En: Greenland, D. J. and Lal, R. (eds.). Soil conservation & management in the humid tropics. John Wiley & Sons. Inglaterra. pp. 49-56.

- Lal, R. 1996. Deforestation and land use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. I. Soil physical and hydrological Properties. *Land Degradation and Development*.7:19-45.
- Lal, R. 1999. Soil quality and soil erosion. Soil and Water Conservation Society. Florida, EUA. pp. 237-258.
- Lal, R.; Lawson T. L.; Anastase, A.H. 1980. Erosivity of tropical rains. En: Boot, M.; Gadriels, D. (eds.). *Assesment of erosion*. John Wiley & Sons.EUA. pp. 143-151.
- Lal, R., D. Mokma, and B. Lowery. 1999. Relation between soil quality and erosion. En: *Soil quality and soil erosion*. Lal, R. (ed.). Soil and Water Conservation Society. Florida, EUA. 189 p.
- Lang, R. D.; McCaffrey, L. A. H. 1984. Ground cover. Its effects on soil loss from grazed runoff plots, gunnedah. *Journal of Soil and Water Conservation*. (40):56-61.
- Lowdermilk, W. C. 1953. Conquest of the land through seven thousand years. *Agric. Info. Bull.no. 99*.U.S. Dep. of Agric. Washington, D.C., EUA. 30 p.
- Maass M., M.; García-Oliva, F. 1990. La conservación de suelos en zonas tropicales: el caso de México. *Ciencia y Desarrollo*, XV (90):21-37.
- Mann, L. K. 1986. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Sci.* (142):279-288.

McCalla II, G. R.; Blackburn, W. H.; Cerril, L. B. 1984. Effects of livestock grazing on sediment production, Edwards Plateau of Texas. *Journal of Range Management*. 37 (4):291-294.

McCormack, D.E., Young, K.K., and Kimberlin, L.W. 1982. Current Criteria for Determining Soil Loss Tolerance. En: Schmidt, B.L., Almaras, R.R., Mannering, J.V. y Papendick, R.I. Determinants Soil Loss Tolerance. ASA Special Publication Number 45. Soil Science Soc. Am., WI, EUA. Pp. 95-111.

Miller, G. T. 1994. Ecología y medio ambiente; introducción a la ciencia ambiental, el desarrollo sustentable y la conciencia de conservación del planeta tierra. Iberoamericana. México. 867 p.

Moreno C., J. G. y Pérez, P. J. 1996. El pastoreo en la producción de ganado bovino. Universidad Autónoma de Chiapas. México. 79 p.

Morgan R., P. C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Mundi-Prensa. Madrid-España. 343 p.

Morgan R., P. C. 1986. Soil erosion and conservation. Logman Ltd. EUA. 343 p.

Narro F., E. 1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Trillas. México. pp. 71-82.

Nitis, I. M. 1991. Prospects for Increasing Forage Supply in Intensive Plantation Crops Systems in Bali. En: Forage for Plantation Crops. ACIAR proceedings No. 32. 24 p.

Oades, J. M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil* (76):319-337.

Ojeda B, W. 1984. Consideraciones sobre la infiltración de agua en el suelo. Tesis (Ing. Agr. Esp. en Irrigación). UACH. 132 p.

Pérez-Nieto, J.; Hernández-García, J.; Hernández-San Román, M. E. 2001. Cobertura y pérdida de suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra en Veracruz. En: Memorias del IV Congreso Nacional Agronómico. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. pp. 49-56.

Pieri, C. 1989. Fertilité des terres de savanes. Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT. Paris, Francia. 60 p.

Pimentel, D.; Stachow, U.; Takacs, D.; Brubaker, H. W.; Dumas, A. R.; Meaney, J. J.; O'neil, A. S.; Onsi, D. E.; Corzilius, D. B. 1992. Conserving biological diversity in agricultural and forestry systems. *BioScience*. 42 (5):1-9.

Pinzón, A. y E. Amézquita. 1991. Compactación de suelos por pisoteo de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. *Pasturas tropicales*. 13 (2):21-26.

Reynolds, S. G. 1995. Pasture - cattle – coconut systems. FAO, Regional Office for Asia and the Pacific. Bangkok, Tailandia. 21 p.

Rudel, T. K.; Flesher, K.; Bates, D.; Baptista, S.; Holmgren, P. 2000. Tropical Deforestation Literature: Geographical and Historical Patterns. *Unasylva* 51 (203):11-18.

Sadeghian, S.; Rivera J., M.; Gómez M., E. 2000. Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de

Colombia. Memorias de la Primera Conferencia Electrónica de la FAO sobre “Agroforestería para la Producción Animal en Latinoamérica”. CIPAV. Cali, Colombia. 11 p.

Sánchez M., D. 1998. Sistemas agroforestales para intensificar de manera sostenible la producción animal en Latinoamérica tropical. Memorias de la Primera Conferencia Electrónica de la FAO sobre “Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica”. CIPAV. Cali, Colombia. 8 p.

Sánchez, P.; Castilla C.; Alegre, J. 1989. Grazing pressure effects on the pasture degradation process. Documento no. 42511. CIAT. pp. 182-187.

Sands, M. W. 1983. Las cabras y la desertificación. En: Memorias del curso intensivo de producción caprina. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 23 p.

SARH. 1994. Aprovechamiento y conservación de los bosques. Memoria Nacional. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. SARH. México, D.F. pp. 33-45.

Saplaco, S. R.; Payawan, P.A. 1987. Soil, Climate, and Soil Erosion Control: State of Knowledge. En: Soil Erosion Management, Proceedings of a Workshop held at PCARRD, Filipinas, 3-5 Diciembre, 1984. Craswell, E.T., Ramenyi, J.V. and Nallana, L.G. (eds.). ACIAR Proceedings Series No. 6:86-89.

Savory, A. 1990. Holistic Resource Management. Island Press. EUA. 616 p.

Schwab, G. O.; Fangmeier D. D.; Elliot W. J.; Frevert, R. K. 1993. Soil and water conservation engineering. 4 ed. EUA. pp. 25-36.

- Schmidt, B. L. 1982. Determinants of soil loss tolerance. American Society of Agronomy & Soil Science Society of America. EUA. pp. 54-66.
- Serna P., A.; Echavarría Ch., F.G. 2002. Caracterización hidrológica de un agostadero comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. Técnica Pecuaria en México. INIFAP. 40 (1):37-53.
- Shelton, H. M. 1993. Chairperson summary paper. Session 56: Silvopastoral systems. En Proceedings 17th International Grassland Congress. February 8-23, 1993. New Zealand Grassland Association y Tropical Grasslands Society of Australia. Palmerston North, New Zealand y Rockhampton, Australia. pp. 2072-2074.
- Skerman, P. L.; Cameron, D. G.; Riveros, F. Tropical forage legumes, and addition. Second edition. FAO. Roma, Italia. 167 p.
- Spiegel, M. R. 1979. Manual de fórmulas y tablas matemáticas. 2,400 fórmulas y 60 tablas. McGraw – Hill. México, D.F. p. 5.
- Takar, A. A.; Dobrowolsky, J. P.; Thurow, T.L. 1991. Influence of grazing, vegetation life-form, and soil type on infiltration rates and interill erosion on a Somalian rangeland. J. Range. Manage. (43):486-490.
- Tergas L., E. 1979. Producción de pastos en suelos ácidos de los trópicos. CIAT. Cali, Colombia. 127 p.

Thurrow, T. L.; Blackburn, W. H.; Taylor Jr., C. A.. 1986. Hydrologic characteristics of vegetation types as affected by livestock grazing systems, Edwards Plateau, Texas. *Journal of Range Management*. 39:505-509.

Troeh, F. R.; Hobbs, J. A.; Donahue, R. L. 1999. *Soil and Water Conservation. Productivity and Environmental Protection*. 3 ed. Prentice Hall. New Jersey, EUA. pp. 68-89.

UNAM. 1996. La restauración de la vegetación; árboles exóticos vs. árboles nativos. *Revista de Difusión de la Facultad de Ciencias*. Ciencias, UNAM. México, D.F. 43:16-23.

Valdés V., E. 2003. Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en Sistemas Agroforestales de Café (*Coffea* spp.) bajo sombra. Tesis de M. C. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. UACH. Chapingo, Estado de México. 257 p.

Valentine, J. F. 1990. *Grazing Management*. Academic Press Inc. EUA. 235 p.

Vega L., A.; Mendoza D., R. 2001. Evaluación de la condición actual de los agostaderos del Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Agrosilvopastoril (CEIEPASP), ubicado en el municipio de Chapa de Mota, Estado de México. Reporte de evaluación de campo. COTECOCA-SAGARPA. México. 48 p.

Verduzco, G. J. 1971. *Apuntes de protección forestal*. Departamento de Divulgación Forestal y de la Fauna. México, D.F. 49 p.

Warren, S. D.; Blackburn, W. H.; Taylor, C. A. 1986. Effects of season and stage of rotation cycle on hidrologic condition of rangeland under intensive rotation grazing. J. Range Management. (39):486-491.

Wischmeier, W. H.; Mannering, J. V. 1969. Relation of soil properties to its erodability. Proc. Am. Soil Soc. (33):131-137.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Transactions American Geophysical Union. 39 (2):285-291.

Wischmeier, W. H.; Johnson, C. B.; Cross, B. V. 1971. A soil erodability nomograph for farmland and construction sites. J. Soil and Water Cons. 26:189-193.

Wood, M. K.; Blackburn, W. H. 1981. Sediment production as influenced by livestock grazing in the Texas rolling plains. J. Range Management. (34): 228-231.

Wooldridge, D. D. 1964. Effects of parent material and vegetation on properties related to soil erosion in Central Washington. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 28 (3):430-432.

9 APÉNDICE

Cuadro A1. Peso y equivalente en Unidades Animal de los animales de la manada usada para el pastoreo de cada una de las parcelas.

ESPECIE	No. de cabezas	Peso promedio por cabeza	Peso vivo total por especie	Unidades Animal por especie
BOVINOS	41	287	11 769	42.63
OVINOS	96	46	4 443	34.57
CAPRINOS	36	37	1 330	12.55
PORCINOS	15	63	952	5.25
EQUINOS	4	348	1 393	7.6
TOTAL	192		19 887	102.6

Cuadro A2. Características físicas y químicas del suelo en el área de estudio (profundidad: 0 a 20 cm), en Chapa de Mota, Estado de México.

Característica	Valor	Método de determinación
pH	5.14	Potenciométrico relación suelo-agua 1:2.
CIC (Cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	36.9	Puente de conductividad en el extracto de la pasta.
M.O. (%)	6.32	Walkley y Black
NI (mg kg ⁻¹)	19.69	Extraído con cloruro de potasio 2N y determinado por arrastre de vapor
P (mg kg ⁻¹)	6.09	Bray P-1
K (mg kg ⁻¹)	666	Extraído en acetato de amonio 1.0N pH 7.0 relación 1:20 y determinado por espectrofotometría de emisión de flama
Ca (mg kg ⁻¹)	410	Extraído en acetato de amonio 1.0N pH 7.0 relación 1:20 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Mg (mg kg ⁻¹)	95	Extraído en acetato de amonio 1.0N pH 7.0 relación 1:20 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Na (mg kg ⁻¹)	21	Extraído con DTPA relación 1:4 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Fe (mg kg ⁻¹)	16.42	Extraído con DTPA relación 1:4 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Cu (mg kg ⁻¹)	0.11	Extraído con DTPA relación 1:4 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Zn (mg kg ⁻¹)	0.19	Extraído con DTPA relación 1:4 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Mn (mg kg ⁻¹)	1.21	Extraído con DTPA relación 1:4 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Formas solubles en el extracto de la pasta		
B (mg kg ⁻¹)	1.11	Extraído con CaCl ₂ 1.0 M Fotocolorimetría de azometina-H
HCO ₃ ⁻ (meq L ⁻¹)	0.30	Volumetría de ácido sulfúrico en el extracto de la pasta
Cl ⁻ (meq L ⁻¹)	1.25	Volumetría de nitrato de plata en el extracto de la pasta
SO ₄ ⁼ (meq L ⁻¹)	0.60	Tubidimetría con cloruro de bario y fotocolorimetría en el extracto de la pasta
pH	6.37	Potenciométrico en el extracto de la pasta
CE (dS m ⁻¹)	0.19	Puente de conductividad en el extracto de la pasta
Na (meq L ⁻¹)	0.07	Espectrofotometría de emisión de flama en el extracto de la pasta
K (meq L ⁻¹)	0.10	Espectrofotometría de emisión de flama en el extracto de la pasta
Ca (meq L ⁻¹)	1.02	Espectrofotometría de absorción atómica en el extracto de la pasta
Mg (meq L ⁻¹)	0.40	Espectrofotometría de absorción atómica en el extracto de la pasta
TEXTURA		Hidrómetro Bouyoucos
ARENA (%)	39.64	
LIMO (%)	54.0	
ARCILLA (%)	6.36	
Clasificación textural	Franco limoso	
CC (%)	72.0	Olla de presión (0.3 atm)
PMP (%)	32.0	Membrana de presión (15.0 atm)

Cuadro A3. Cobertura del suelo por mantillo en cuatro tratamientos bajo bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

OBSERVACIÓN	T1	T2	T3	T4
Una semana antes del pastoreo				
Porcentaje de suelo cubierto	100	92.6	86.83	95.5
Profundidad del mantillo (cm)	4.16	4	5	4.33
Peso fresco del mantillo (kg/ha)	100 986.7	80 706.6	125 466.6	89 480
Peso seco del mantillo (kg/ha)	45 466.6	30 253.3	43 466.6	33 093.3
Una semana después del pastoreo				
Porcentaje de suelo cubierto	75.66	81	88.3	98.66
Profundidad del mantillo (cm)	3	3.63	2.76	4.2
Peso fresco del mantillo (kg/ha)	75 746.6	78 213.3	41 586.6	58 920
Peso seco del mantillo (kg/ha)	30 786.6	33 813.3	24 066.6	28 133.3
Tres meses después del pastoreo				
Porcentaje de suelo cubierto	88.33	87.66	89.66	99
Profundidad del mantillo (cm)	4.2	3.93	3.2	4.46
Peso fresco del mantillo (kg/ha)	58 000	51 866.6	40 720	46 960
Peso seco del mantillo (kg/ha)	34 666.6	37 066.6	26 173.3	32 840

Cuadro A4. Cobertura herbácea basal y aérea (%) por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

Tratamiento	Antes (%)		Después (%)		3 meses después (%)	
	Basal	Aérea	Basal	Aérea	Basal	Aérea
T 1	0.7654	28.036	0.785	16.952	0.826	19.896
T 2	1.680	34.814	0.748	31.508	0.875	32.25
T 3	0.138	12.845	0.119	11.659	0.121	12.088
T 4	1.569	49.57	2.120	66.31	2.186	67.018

Tratamientos con carga animal instantánea alta (T1), media (T2), baja (T3) y nula (T4).

Cuadro A5. Cobertura arbustiva basal y aérea (%), por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

Tratamiento	Antes		Después		3 meses después	
	basal	aérea	basal	aérea	basal	aérea
T1	0.539	84.16	0.50	64.45	0.50	74.5
T2	0.621	35.5	0.60	32.8	0.63	36.14
T3	0.445	32.06	0.41	27.91	0.42	30.07
T4	0.615	44.48	0.82	51.73	0.81	53.16

Tratamientos con carga animal instantánea alta (T1), media (T2), baja (T3) y nula (T4).

Cuadro A6. Cobertura arbórea aérea (%), por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

Tratamiento	Antes	Después	3 meses después
T1	100	100	100
T2	62.6	62.9	64.4
T3	89.5	89.8	90.6
T4	72.4	72.4	72.8

Tratamientos con carga animal instantánea alta (T1), media (T2), baja (T3) y nula (T4).

Cuadro A7. Precipitación pluvial (mm) registrada en el año 2002, en Chapa de Mota, Estado de México.

Día	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0	0	0	14	0	4	21	4	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	6	0
3	0	0	0	0	0	6	5	6	6	0	2	0
4	0	0	0	6	0	3	0	1	3	26	2	3
5	0	0	0	4	0	0	6	0	0	0	56	0
6	0	0	0	0	0	0	36	0	57	0	0	3
7	0	0	0	0	0	2	12	0	28	0	1	0
8	0	0	0	0	0	12	26	0	48	5	6	0
9	0	0	0	10	0	4	7	0	0	0	0	0
10	0	2	0	0	0	8	10	0	11	0	0	0
11	0	0	0	6	0	3	12	0	50	0	0	0
12	10	0	0	0	0	0	15	0	12	0	0	0
13	16	0	0	0	0	0	43	0	6	0	0	0
14	0	0	0	0	0	2	16	62	28	0	0	0
15	0	0	0	1	4	0	13	0	6	0	0	0
16	0	0	0	1	1	0	2	0	10	2	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	6	2	0	0
18	0	0	0	0	0	0	22	8	0	14	0	0
19	0	0	0	0	0	0	10	42	26	0	0	0
20	0	0	4	0	0	0	14	0	4	0	0	0
21	0	14	0	0	0	3	0	0	0	10	0	0
22	0	0	0	0	0	1	14	0	12	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	16	0	25	0	0
24	0	0	0	0	6	0	0	0	0	4	0	0
25	0	0	0	0	0	0	14	0	1	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	2	0	0	20	2	0	0
28	0	0	0	0	0	29	2	6	2	0	0	0
29	0	-	0	0	0	32	8	0	0	1	0	0
30	0	-	0	0	0	4	9	0	21	1	0	0
31	0	-	1	-	0	-	8	22	-	0	-	0
SUMA	26	16	5	42	11	115	355	167	357	92	73	6
ACUMULADO	26	42	47	89	100	215	570	737	1 094	1 186	1 259	1 265

Cuadro A8. Esgurrimiento captado por tratamiento con pastoreo en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

T1: Tratamiento con carga animal instantánea alta (1 067.9 UA/ha).

No. de evento de lluvia	Fecha	Volúmen de la muestra (litros)	Lámina de agua en tambos (cm)	Volumen captado (litros)	Esgurrimiento por ha (litros)	Lámina de agua escurrida (mm)	Coficiente de escurrimiento (%)
1	09/JUL/02	0.781	5	15.60	55.365	0.0055	0.0002
2	11/JUL/02	0.913	4	12.50	44.363	0.0044	0.0443
3	12/JUL/02	0	0	0.00	0.000	0.0	0.0
4	13/JUL/02	0.817	6	18.70	66.368	0.0066	0.0442
5	14/JUL/02	0.743	4	12.50	44.363	0.0044	0.0103
6	15/JUL/02	0.915	11	30.90	109.666	0.0109	0.0685
7	19/JUL/02	0.888	2	6.20	22.004	0.0022	0.0100
8	20/JUL/02	0.902	2	6.20	22.004	0.0022	0.0220
9	21/JUL/02	0.908	4	12.50	44.363	0.0044	0.0316
10	23/JUL/02	0.907	3	9.30	33.006	0.0033	0.0235
11	26/JUL/02	0.857	2	6.20	22.004	0.0022	0.0157
12	01/AGO/02	0.745	2	6.20	22.004	0.0022	0.0275
13	15/AGO/02	0.66	1.5	4.60	16.326	0.0016	0.0025
14	19/AGO/02	0.909	8	24.90	88.372	0.0088	0.1104
15	20/AGO/02	0.889	6	18.70	66.368	0.0066	0.0158
16	24/AGO/02	0.835	4	12.50	44.363	0.0044	0.0277
17	01/SEPT/02	0.91	3.7	11.50	40.814	0.0040	0.0185
18	04/SEPT/02	0.926	1.5	4.60	16.326	0.0016	0.0272
19	07/SEPT/02	0.906	3.5	10.90	38.685	0.0038	0.0138
20	12/SEPT/02	1.102	23	63.50	225.366	0.0225	0.0450
21	13/SEPT/02	0.987	3.2	9.90	35.136	0.0035	0.0292
22	17/SEPT/02	0.974	11	30.90	109.666	0.0109	0.1096
23	20/SEPT/02	0.976	5.5	17.16	60.902	0.0060	0.0234
TOTAL			115.9	345.960	1 227.836	0.123	0.0313
Promedio anual/evento			5.039	15.042	53.384	0.005	

Cuadro A8. Continuación...

T2: Tratamiento con carga animal instantánea media (519.07 UA/ha).

No. de evento de lluvia	Fecha	Volúmen de la muestra (litros)	Lámina de agua en tambos (cm)	Volumen captado (litros)	Escorrentamiento por ha (litros)	Lámina de agua escurrida (mm)	Coefficiente de escurrimiento (%)
1	09/JUL/02	0.863	9	25.2	87.240	0.0087	0.0335
2	11/JUL/02	0.865	5	14	48.467	0.0048	0.0484
3	12/JUL/02	0	0	0	0	0	0
4	13/JUL/02	0.882	9	25.2	87.240	0.0087	0.0581
5	14/JUL/02	0.913	8	22.4	77.547	0.0077	0.0180
6	15/JUL/02	0.902	41	109.5	379.080	0.0379	0.2369
7	19/JUL/02	0.82	2.5	7	24.233	0.0024	0.0110
8	20/JUL/02	0.877	3	8.4	29.080	0.0029	0.0290
9	21/JUL/02	0.943	12	33.6	116.321	0.0116	0.0830
10	23/JUL/02	0.886	2.5	7	24.233	0.0024	0.0173
11	26/JUL/02	0.925	4	11.2	38.774	0.0038	0.0277
12	01/AGO/02	0.796	2.2	6.1	21.118	0.0021	0.0264
13	15/AGO/02	0.825	1.8	5	17.310	0.0017	0.0027
14	19/AGO/02	0.962	15	40.9	141.593	0.0141	0.1769
15	20/AGO/02	1.068	10	28	96.934	0.0096	0.0230
16	24/AGO/02	0.817	5	14	48.467	0.0048	0.0302
17	01/SEPT/02	0.978	5.5	15.4	53.314	0.0053	0.0242
18	04/SEPT/02	0.992	1.5	4.2	14.540	0.0014	0.0242
19	07/SEPT/02	0.885	4.5	12.6	43.620	0.0043	0.0076
20	12/SEPT/02	1.035	43.2 1° y 4 2°	126.6	438.279	0.0438	0.0876
21	13/SEPT/02	1.037	3.7	10.3	35.658	0.0035	0.0297
22	17/SEPT/02	1.016	43.2 1° y 5 2°	129.4	447.973	0.0447	0.4479
23	20/SEPT/02	0.982	6.5	18.2	63.007	0.0063	0.0242
TOTAL			247.1	674.2	2334.027	0.233	0.0638
Promedio anual/evento			10.743	29.313	101.479	0.010	

Cuadro A8. Continuación...

T3: Tratamiento con carga animal instantánea baja (347.25 UA/ha).

No. de evento de lluvia	Fecha	Volúmen de la muestra (litros)	Lámina de agua en tambos (cm)	Volumen captado (litros)	Escurrimiento por ha (litros)	Lámina de agua escurrida (mm)	Coefficiente de escurrimiento (%)
1	09/JUL/02	0.825	9	25.2	85.290	0.0085	0.0328
2	11/JUL/02	0.851	4	11.2	37.907	0.0037	0.0379
3	12/JUL/02	0.838	2	5.6	18.953	0.0018	0.0172
4	13/JUL/02	0.902	8.5	23.8	80.552	0.0080	0.0537
5	14/JUL/02	0.858	3.5	9.8	33.169	0.0033	0.0077
6	15/JUL/02	0.906	11	30.8	104.244	0.0104	0.0651
7	19/JUL/02	0.896	2	5.6	18.953	0.0018	0.0086
8	20/JUL/02	0.892	2.5	7.0	23.692	0.0023	0.0236
9	21/JUL/02	0.938	3	8.4	28.430	0.0028	0.0203
10	23/JUL/02	0.895	3	8.4	28.430	0.0028	0.0203
11	26/JUL/02	0.865	3	8.4	28.430	0.0028	0.0203
12	01/AGO/02	0.814	2.4	6.7	22.676	0.0022	0.0283
13	15/AGO/02	0.753	1.8	5.0	16.923	0.0016	0.0027
14	19/AGO/02	0.962	8	22.4	75.814	0.0075	0.00001
15	20/AGO/02	1.095	5	14.0	47.384	0.0047	0.0112
16	24/AGO/02	0.842	4.5	12.6	42.645	0.0042	0.0266
17	01/SEPT/02	1.009	5.5	15.4	52.122	0.0052	0.0236
18	04/SEPT/02	0.956	1.8	5.0	16.923	0.0016	0.0282
19	07/SEPT/02	0.974	4	11.2	37.907	0.0037	0.0066
20	12/SEPT/02	1.034	25	67.7	229.133	0.0229	0.0458
21	13/SEPT/02	0.948	3.7	10.3	34.861	0.0034	0.0290
22	17/SEPT/02	0.964	13.5	37.8	127.936	0.0127	0.1279
23	20/SEPT/02	0.934	7.5	21.0	71.075	0.0071	0.0273
TOTAL			134.2	373.3	1263.449	0.126	0.0289
Promedio anual/evento			5.83	16.23	54.933	0.005	

Cuadro A8. Continuación...

T4: Tratamiento con carga animal instantánea nula.

No. de evento de lluvia	Fecha	Volúmen de la muestra (litros)	Lámina de agua en tambos (cm)	Volumen captado (litros)	Escorrentamiento por ha (litros)	Lámina de agua escurrida (mm)	Coefficiente de escurrimiento (%)
1	09/JUL/02	0.818	7.3	22.4	76.705	0.0076	0.0295
2	11/JUL/02	0.866	5	15.3	52.392	0.0052	0.0523
3	12/JUL/02	0.696	2	6.1	20.888	0.0020	0.0189
4	13/JUL/02	0.911	6	18.4	63.007	0.0063	0.0420
5	14/JUL/02	0.832	5	15.3	52.392	0.0052	0.0121
6	15/JUL/02	0.806	12.5	34.9	119.509	0.0119	0.0746
7	19/JUL/02	0.904	2	6.1	20.888	0.0020	0.0094
8	20/JUL/02	0.895	3	9.1	31.161	0.0031	0.0311
9	21/JUL/02	0.899	4	12.2	41.777	0.0041	0.0298
10	23/JUL/02	0.878	3.5	10.7	36.640	0.0036	0.0261
11	26/JUL/02	0.79	3	9.1	31.161	0.0031	0.0222
12	01/AGO/02	0.804	2.6	7.9	27.052	0.0027	0.0338
13	15/AGO/02	0.748	1.5	4.6	15.752	0.0015	0.0025
14	19/AGO/02	1.025	9	27.6	94.511	0.0094	0.1181
15	20/AGO/02	0.986	6	18.4	63.007	0.0063	0.0150
16	24/AGO/02	0.847	4.2	12.8	43.831	0.0043	0.0273
17	01/SEPT/02	0.928	4.6	14.1	48.283	0.0048	0.0219
18	04/SEPT/02	0.917	1.8	5.5	18.834	0.0018	0.0313
19	07/SEPT/02	0.979	4	12.2	41.777	0.0041	0.0073
20	12/SEPT/02	1.036	21	57.8	197.926	0.0197	0.0395
21	13/SEPT/02	0.994	3.5	10.7	36.640	0.0036	0.0305
22	17/SEPT/02	0.97	12	33.5	114.715	0.0114	0.1147
23	20/SEPT/02	0.997	6.5	20	68.486	0.0068	0.0263
TOTAL			130	384.7	1317.335	0.132	0.0355
x anual/evento			5.6	16.726	57.275	0.006	

Cuadro A9. Sedimento captado por tratamiento de pastoreo, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

T1: Tratamiento con carga animal instantánea alta (1 067.9 UA/ha).

Número de evento de lluvia	Fecha	Sedimento por muestra (g)	Sedimento por litro (g/litro)	Sedimento por parcela (g)	Sedimento por ha (g/ha)
1	09/JUL/02	1.6	2.05	31.96	113.42
2	11/JUL/02	0.4	0.44	5.48	19.44
3	12/JUL/02	0.0	0.0	0.0	0.0
4	13/JUL/02	0.2	0.24	4.58	16.25
5	14/JUL/02	0.8	1.08	13.46	47.77
6	15/JUL/02	0.3	0.33	10.13	35.96
7	19/JUL/02	0.5	0.56	3.49	12.39
8	20/JUL/02	0.4	0.44	2.75	9.76
9	21/JUL/02	0.7	0.77	9.64	34.20
10	23/JUL/02	0.6	0.66	6.15	21.83
11	26/JUL/02	0.2	0.23	1.45	5.14
12	01/AGO/02	0.3	0.40	2.50	8.86
13	15/AGO/02	0.2	0.30	1.39	4.95
14	19/AGO/02	0.4	0.44	10.96	38.89
15	20/AGO/02	0.3	0.34	6.31	22.40
16	24/AGO/02	0.4	0.48	5.99	21.25
17	01/SEP/02	1.3	1.43	16.43	58.31
18	04/SEP/02	0.8	0.86	3.97	14.10
19	07/SEP/02	0.6	0.66	7.22	25.62
20	12/SEP/02	0.6	0.54	34.57	122.70
21	13/SEP/02	0.8	0.81	8.02	28.48
22	17/SEP/02	0.6	0.62	19.03	67.56
23	20/SEP/02	0.5	0.51	8.79	31.20
TOTAL		12.5	14.19	214.27	760.46
Promedio		0.543	0.616	9.32	33.06

Cuadro A9. Continuación...

T2: Tratamiento con carga animal instantánea media (519.07 UA/ha).

Número de evento de lluvia	Fecha	Sedimento por muestra (g)	Sedimento por litro (g/litro)	Sedimento por parcela (g)	Sedimento por ha (g/ha)
1	09/JUL/02	0.4	0.46	11.68	40.44
2	11/JUL/02	0.2	0.23	3.24	11.21
3	12/JUL/02	0.0	0.0	0.0	0.0
4	13/JUL/02	0.6	0.68	17.14	59.35
5	14/JUL/02	0.3	0.33	7.36	25.48
6	15/JUL/02	0.9	1.00	109.26	378.24
7	19/JUL/02	0.2	0.24	1.71	5.91
8	20/JUL/02	0.3	0.34	2.87	9.95
9	21/JUL/02	0.5	0.53	17.82	61.68
10	23/JUL/02	0.2	0.23	1.58	5.47
11	26/JUL/02	0.2	0.22	2.42	8.38
12	01/AGO/02	0.4	0.50	3.07	10.61
13	15/AGO/02	0.3	0.36	1.82	6.29
14	19/AGO/02	0.6	0.62	25.51	88.31
15	20/AGO/02	0.3	0.28	7.87	27.23
16	24/AGO/02	0.3	0.37	5.14	17.80
17	01/SEP/02	0.4	0.41	6.30	21.81
18	04/SEP/02	0.4	0.40	1.69	5.86
19	07/SEP/02	0.5	0.56	7.12	24.64
20	12/SEP/02	0.4	0.39	48.93	169.38
21	13/SEP/02	0.9	0.87	8.94	30.95
22	17/SEP/02	0.6	0.59	76.42	264.55
23	20/SEP/02	0.4	0.41	7.41	25.66
TOTAL		9.3	10.02	375.28	1299.20
Promedio		0.404	0.43	16.32	56.49

Cuadro A9. Continuación...

T3: Tratamiento con carga animal instantánea baja (347.25 UA/ha).

Número de evento de lluvia	Fecha	Sedimento por muestra (g)	Sedimento por litro (g/litro)	Sedimento por parcela (g)	Sedimento por ha (g/ha)
1	09/JUL/02	0.5	0.61	15.27	51.69
2	11/JUL/02	0.7	0.82	9.21	31.18
3	12/JUL/02	0.6	0.72	4.01	13.57
4	13/JUL/02	0.2	0.22	5.28	17.86
5	14/JUL/02	0.3	0.35	3.43	11.60
6	15/JUL/02	0.8	0.88	27.20	92.05
7	19/JUL/02	0.6	0.67	3.75	12.69
8	20/JUL/02	0.4	0.45	3.14	10.62
9	21/JUL/02	0.2	0.21	1.79	6.06
10	23/JUL/02	0.2	0.22	1.88	6.35
11	26/JUL/02	0.3	0.35	2.91	9.86
12	01/AGO/02	0.1	0.12	0.82	2.79
13	15/AGO/02	0.4	0.53	2.66	8.99
14	19/AGO/02	1.1	1.14	25.61	86.69
15	20/AGO/02	0.4	0.37	5.11	17.31
16	24/AGO/02	0.5	0.59	7.48	25.32
17	01/SEP/02	0.5	0.50	7.63	25.83
18	04/SEP/02	0.7	0.73	3.66	12.39
19	07/SEP/02	0.4	0.41	4.60	15.57
20	12/SEP/02	0.6	0.58	39.28	132.96
21	13/SEP/02	0.8	0.84	8.69	29.42
22	17/SEP/02	1.2	1.24	47.05	159.26
23	20/SEP/02	0.5	0.54	11.24	38.05
TOTAL		12	13.09	241.72	818.11
Promedio		0.522	0.569	10.51	35.57

Cuadro A9. Continuación...

T4: Tratamiento con carga animal instantánea nula.

Número de evento de lluvia	Fecha	Sedimento por muestra (g)	Sedimento por litro (g/litro)	Sedimento por parcela (g)	Sedimento por ha (g/ha)
1	09/JUL/02	0.4	0.49	10.95	37.51
2	11/JUL/02	0.3	0.35	5.30	18.15
3	12/JUL/02	0.2	0.29	1.75	6.0
4	13/JUL/02	0.5	0.55	10.10	34.58
5	14/JUL/02	0.7	0.84	12.87	44.08
6	15/JUL/02	0.9	1.12	38.97	133.45
7	19/JUL/02	0.3	0.33	2.02	6.93
8	20/JUL/02	0.3	0.34	3.05	10.45
9	21/JUL/02	0.5	0.56	6.79	23.24
10	23/JUL/02	0.3	0.34	3.66	12.52
11	26/JUL/02	0.3	0.38	3.46	11.83
12	01/AGO/02	0.3	0.37	2.95	10.09
13	15/AGO/02	0.2	0.27	1.23	4.21
14	19/AGO/02	0.6	0.59	16.16	55.32
15	20/AGO/02	0.4	0.41	7.46	25.56
16	24/AGO/02	0.4	0.47	6.04	20.70
17	01/SEP/02	0.2	0.22	3.04	10.41
18	04/SEP/02	0.1	0.11	0.60	2.05
19	07/SEP/02	0.2	0.20	2.49	8.53
20	12/SEP/02	0.3	0.29	16.74	57.31
21	13/SEP/02	0.2	0.20	2.15	7.37
22	17/SEP/02	0.4	0.41	13.81	47.31
23	20/SEP/02	0.3	0.30	6.02	20.61
TOTAL		8.3	9.43	177.62	608.22
Promedio		0.361	0.41	7.72	26.44

Cuadro A10. Resultados del análisis de varianza de la resistencia a la penetración del suelo, por tratamiento, en un bosque de encino, en Chapa de Mota, Estado de México.

Tratamiento	Profundidad (cm)			
	0	10	30	60
1	187.3 a	202.2 a	191.5 a	166.0 b
2	220.7 a	197.2 a	173.5 b	173.5 b
3	214.7 a	238.2 a	166.0 c	191.5 a
4	188.3 a	218.5 a	192.0 a	192.0 a
DMS (Tukey)	93.81	88.15	6.3637	9.29

Valores con la misma literal indican que no hay diferencias estadísticamente significativas al 5 % entre tratamientos.